

Zusammenfassung

Moderne Messsysteme wie die zielverfolgenden Servotachymeter oder das „Global Positioning System, (GPS)“ ermöglichen durch die Kombination einzelner Komponenten mit intelligenten Auswertelgorithmen viele neue Anwendungsbereiche in der modernen Ingenieurgeodäsie. Der Einsatz dieser Geräte im Vermessungswesen beschränkte sich in den Anfängen zunächst auf *statische, quasi-statische oder „stop-and-go“* Verfahren. Heute werden diese leistungsfähigen Messsensoren immer häufiger auch für „**kinematische Messaufgaben**“ eingesetzt. Angaben zur Messunsicherheit setzen sich hierbei stets aus einer im Hinblick auf die Messgenauigkeit der einzelnen Subsysteme konstanten und einer bewegungsabhängigen Größe zusammen.

Verschiedene Anwendungen zur genauen Beschreibung der Bewegungsspur und zur Optimierung der horizontalen und vertikalen Verfügbarkeit erfordern oft eine **Kombination** dieser separat arbeitenden Messsensoren. In der Regel besteht bei einem zielverfolgenden Servotachymeter oder bei GPS jedoch keine Kombinationsmöglichkeit ohne Eingriff in die Hard- und Software. In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode vorgestellt, die durch eine umfassende Betrachtung aller Stör- und Einflussgrößen eine **Synchronisation** unabhängiger Messsysteme ohne eine gemeinsame Basis ermöglicht. Der Begriff „**Integrity**“ (Erkennen von Fehlfunktionen) spielt bei der Fusion einzelner Messsensoren eine zentrale Rolle.

Eine Kalibrierung solcher kinematischer Messsensoren hinsichtlich der Beschreibung verschiedener Bewegungsabläufe erfordert eine Erweiterung der herkömmlichen geodätischen Prüfstrategien. Ausgehend von den statischen Eigenschaften müssen diese Sensoren mit neuen kinematischen Prüfmethode**n** bzgl. der Art, der Größe und des Verhaltens der Messunsicherheit bewegter Zielpunkte untersucht werden. Außerdem sind die Echtzeitfähigkeit des Messsystems und die Synchronisation der einzelnen Subsysteme zu verifizieren und ggf. durch entsprechende Eichfunktionen zu minimieren.

Als Ergebnis entsteht ein **Hybridmesssystem** für kinematische Anwendungen, das unabhängig von der Bewegungsart eine exakte Ableitung der Bewegungsspur aus diskreten Messpunkten im Millimeterbereich ermöglicht. Solche Hybridmesssysteme können z. B.

- als **hochgenaues Ortungssystem** zur Navigation und Steuerung von Prozessabläufen im Straßen- und Gleisbau (Machine Guidance),
- bei **Spezialanwendungen** höchster Verfügbarkeits- und Genauigkeitsanforderung von **Land-, Wasser- oder Luftfahrzeugen**,
- als **Referenzsystem** zur Untersuchung der realisierbaren Genauigkeit von Ortungs- und Applikationstechniken und
- zur **Untersuchung technischer Reaktionszeiten** von Teil- und Gesamtsystemen im Precision Farming Bereich

angewandt werden.

Die Beschreibung einer ausgewählten Anwendung beschränkt sich in dieser Arbeit auf die Untersuchung der teilschlagspezifischen Landnutzung mit dem genormten „Landwirtschaftlichen BUS System, LBS (DIN 9684 und ISO 11783)“ bzgl. der Positionsgenauigkeit, der Präzision, der Qualität und der auftretenden Störgrößen. Diese Erkenntnisse resultieren aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt im Forschungsverbund Agrarökosysteme München (FAM), das am Lehrstuhl für Geodäsie (Technische Universität München) in Kooperation mit dem Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Fachgebiet Technik im Pflanzenbau (Technische Universität München/Weihenstephan) durchgeführt wurde.

Summary

By combining individual components with intelligent analytical algorithms, modern measuring systems such as robot tacheometer or the „Global Positioning System, (GPS)“ allow many new areas of application in modern engineering surveying. Use of this equipment is initially limited to static, quasi-static or stop-and-go techniques. Today, these efficient measuring sensors are used increasingly for kinematic measuring tasks.

Different applications for the precise description of the movement track and for optimizing the horizontal and vertical availability require a combination of these measuring sensors, which operate separately. Normally both these measuring instruments cannot be combined without changing hardware or software (firmware) This thesis presents a method that allows a synchronization of independent measuring systems without a common basis through a comprehensive observation of all factors of disturbance and influence. Calibration of terrestrial and global measuring sensors for kinematic applications is also discussed in detail.

With respect to the description of dynamic movement processes, a calibration of this kind of kinematic measuring sensors requires an expansion of conventional geodetic strategies. Based on static characteristics, these sensors must be tested using kinematic testing methods relating to the type, size and behaviour of target points affected by measuring uncertainty. In addition, the real time capability of the measuring system and the synchronization of individual subsystems must be verified and, if required, minimized by corresponding calibration functions.

The result is a hybrid measuring system for kinematic applications that, independent of the type of movement, allows a precise derivation of the movement path based on discrete measuring points on a millimeter scale. For example, these hybrid measuring systems can be employed for the following:

- as a **high precision positioning system** for navigation and control of process flows in road and railways track construction (machine guidance),
- for **special applications** involving maximum availability and accuracy requirements for land and water vehicles or aircraft,
- as a **reference system** to verify the feasible accuracy of positioning and application techniques, and
- to **analyze technical reaction times** of partial and overall systems in the precision farming sector.

The descriptions of selected applications in this thesis are limited to testing of section specific land use with the „Landwirtschaftlichen BUS System LBS, (DIN 9684 and ISO 11783)“ with respect to position accuracy, precision, quality, and size of disturbances occurring. Investigations have been partly funded by a joint research project within the „Forschungsverbund Agrarökosysteme München, (FAM)“ research alliance, which took place at the Chair for Geodesy in cooperation with the Department for Bio Resources and Land Use Technology, Crop Production Engineering (both at the Technical University of Munich).

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	7
1.1	Aufgabenstellung	7
1.2	Grundlagen kinematischer Messverfahren	10
1.3	Integrity durch Kombination verschiedener Messverfahren	14
1.4	Bisherige Arbeiten	16
1.5	Ziel der Arbeit	18
2	Schaffung einer einheitlichen Zeitbasis	20
2.1	Grundlagen der verschiedenen Zeitsysteme	20
2.2	Darstellung und Verbreitung der Zeitsysteme	23
2.3	System zur GPS-Zeiterfassung für kinematische Messaufgaben	29
3	Kinematische GPS-Beobachtungen	33
3.1	Technische Grundlagen kinematischer Beobachtungen	33
3.1.1	Allgemeine Systemfehler	34
3.1.2	Stand-alone Verfahren	37
3.1.3	Differentielles GPS-Verfahren	40
3.1.4	RTKGPS-Verfahren	44
3.2	Fehlereinflüsse bei kinematischen Anwendungen	46
3.2.1	Parameterbestimmung	46
3.2.2	Latenzzeit bei GPS-Beobachtungen	48
3.3	Genauigkeitsuntersuchungen kinematischer GPS-Beobachtungen	55
4	Zielverfolgender Servotachymeter	62
4.1	Technische Grundlagen	62
4.1.1	Automatische Zielerfassung und -verfolgung	64
4.1.2	Externe Geräteansteuerung und automatisches Messen im Trackingmode	68
4.1.3	Winkelmessung bei kinematischen Anwendungen	69
4.1.4	Distanzmessung bei kinematischen Anwendungen	73
4.2	Zeitliches Verhalten	75
4.2.1	Funktionale Beziehung	77
4.2.2	Verfahren zur Bestimmung der Latenzzeit	80
4.3	Kalibrierungsanlage	88
5	Sensorfusion	92
5.1	Echtzeitfusion - GPS und zielverfolgender Servotachymeter	93
5.2	Kalibrierung des Gesamtsystems	95
5.2.1	Laborkalibrierung	95
5.2.2	Kalibrierung mit reproduzierbarer Solltrajektorie	96
5.2.3	Feldkalibrierung ohne reproduzierbare Solltrajektorie	99
5.3	Positionsschätzung kinematischer Beobachtungen	100
5.4	Synchronisationsmodell	102
6	Kalibrierung von Precision Farming Systemen	105
6.1	Grundlagen Precision Farming	105
6.2	Aufgabenstellung im Teilprojekt FAM LT2 und LQ3	108
6.3	Kalibrierung des Ortungssystems	109
6.4	Ergebnisdarstellung	110
7	Schlussbemerkung und Ausblick	111

8	Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen	112
9	Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen	117
10	Verzeichnis der Abbildungen und der Tabellen	118
11	Literaturverzeichnis	122

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung

Nach [RINNER, 1984] hat die Ingenieurgeodäsie das Gesamtgebiet der Geodäsie zur Bewältigung der praktischen Anforderungen anderer Ingenieurdisziplinen, speziell des Bauwesens, des Maschinenbaus und nach [WUNDERLICH, 2003] auch des Anlagenbaus zum Inhalt.

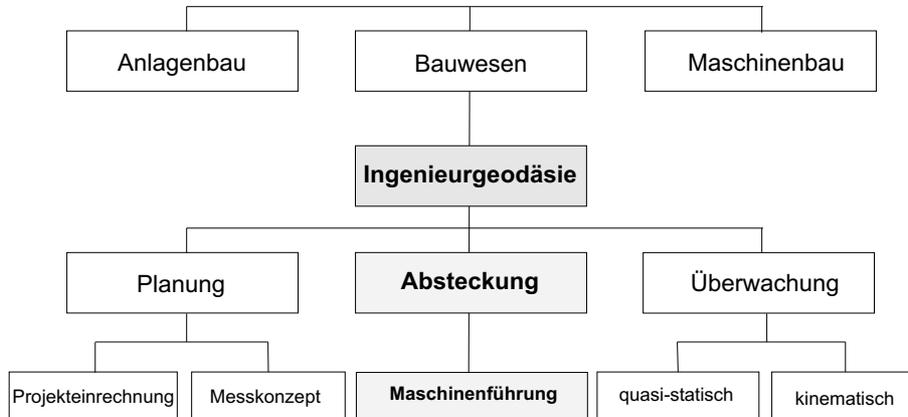


Abbildung 1.1: Einsatzphasen und Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, [WUNDERLICH, 2003]

Die Bestimmung, Visualisierung und Interpretation von geometrischen Größen (z. B. Höhen- und Lagepunkte) in einem geeigneten Bezugsrahmen spielt hierbei eine wichtige Rolle. Entsprechend der Planung, Absteckung und Überwachung werden zur Beschreibung dieser Messgrößen und -aufgaben unterschiedliche Messverfahren eingesetzt. Die Genauigkeit der Messung leitet sich hierbei immer aus der gemessenen und reduzierten Beobachtungsgröße (Istwert) und einer unbekanntem theoretischen Größe (Sollwert) ab. Unter Berücksichtigung verschiedener Einflussgrößen wie der Reichweite (atmosphärische Auswirkung auf die Signalausbreitung), stochastischer Fehler, Aufstell-, Zentrierungs- und Anzielungsfehlern sowie der Messgenauigkeit der jeweiligen Subsysteme (geschlossene Einheit, z. B. der Entfernungsmessteil im Tachymeter) des verwendeten Instrumentariums können bei statischen Messaufgaben Ergebnisse im Submillimeterbereich erzielt werden. Eine komplette, d. h. eine dreidimensionale Beschreibung dynamischer Prozesse bezogen auf eine homogene Zeiteinheit mittels kinematischer Messverfahren kann lediglich innerhalb einiger Millimeter bis zu wenigen Zentimetern (abhängig von den Umgebungsverhältnissen, der Reichweite und dem Messverfahren) erreicht werden. Im Vermessungswesen wird der Begriff Kinematik gelegentlich nicht eindeutig verwendet und fälschlicherweise mit dem Begriff der Dynamik verwechselt. Es ist stets auf eine klare Trennung der Begriffe Kinematik und Dynamik zu achten. In Hütte „Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“, [CZICHOS, 1989] heißt es

„Gegenstand der Kinematik ist die Beschreibung der Lage und Bewegung von Punkten und Körpern mit Mitteln der analytischen Geometrie. Dabei spielen weder physikalische Körpereigenschaften noch Kräfte als Ursache von Bewegungen eine Rolle ...“

Hingegen erklärt sich der Begriff der Dynamik durch die Newton'sche Bewegungsgleichung (dynamische Grundgleichung), wobei die auf einen Körper wirkenden Kräfte durch seine Masse und die wirkenden Beschleunigungen verursacht werden ($Kraft = Masse \cdot Beschleunigung$).

In der Geodäsie existieren schon seit langer Zeit Messverfahren, die sich auf bewegte Objekte wie z. B. Bauwerksbewegungen, Deformationsmessungen aller Art oder Sternbewegungen in der geodätischen Astronomie beziehen [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000]. So musste z. B. bei der astronomischen Ortsbestimmung das Fernrohr des Vermessungsinstruments stets manuell durch einen Beobachter auf das bewegte Ziel (Sterndurchgang) nachgeführt werden. Ein direkter Zeitabgriff war bei der Erfassung der Messwerte nicht gegeben. Seit etwa 20 Jahren existieren Messsensoren, die bewegte Ziele selbstständig, d. h. ohne operationalen Eingriff beobachten können. Mit den implementierten Rechen- und Auswertelgorithmen werden intern die einzelnen Koordinaten jeder Messepoche berechnet und je nach Messverfahren und Instrument mit einer genauen (± 1 ms) oder ungenaueren (Sekundenaufösung) Zeitinformation gespeichert bzw. ausgegeben. Somit kann mit diesen terrestrisch

oder satellitengestützt messenden Sensoren die Trajektorie beliebiger Objektbewegungen automatisch bestimmt werden. In der kinematischen Vermessung wird mit dem Begriff der Trajektorie nicht die allgemeine Definition (mathematische Kurven, die sämtliche Kurven einer ebenen Kurvenschar schneiden) gemeint, sondern die Beschreibung einer Bewegungsspur im dreidimensionalen Objektraum durch diskrete Messpunkte. Dies spielt vor allem in der Maschinenführung eine wesentliche Rolle (vgl. Abb. 1.1).

Die im Vermessungswesen wichtigsten kinematischen Messsensoren sind

- die Empfänger des **NAVSTAR GPS** (NAVigation System with Time And Ranging, Global Positioning System) mit den drei Verfahren „Real Time Kinematic-, Differential-, Stand-alone-“ Verfahren, außerdem Empfänger des russischen Systems **GLONASS** (GLObal NAVigation Satellites System) und in Zukunft auch Empfänger des europäischen Systems **GALILEO** (Europäische Globale Navigations Satelliten System GALILEO),
- der **zielverfolgende Servotachymeter** (terrestrisches Positionierungssystem, TPS),
- das Inertial Navigation System (INS),
- der Lasertracker und das Laserinterferometer
- und Zusatzsensoren wie, der elektronische Neigungssensor, oder der elektronische Kompass.

Zusätzlich sind in der Aufzählung kinematischer Messsensoren noch photogrammetrische Systeme und kapazitive, induktive oder opto-elektronische Entfernungsaufnehmer [SCHWARZ, 1996] zu nennen.

Die Messungen werden in den seltensten Fällen im strengen Sinne kontinuierlich erfasst, sondern aus diskreten Einzelmessungen der Epochen ϵ_i abgeleitet. Abhängig von der Geschwindigkeit, der Orientierung und den Bewegungsabläufen des Zielpunkts (gleich- oder ungleichförmig) ist die zeitliche Abfolge der Beobachtung $\Delta t_{i,i+1}$ zwischen zwei aufeinander folgenden Messepochen zu wählen. Sowohl der zielverfolgende Servotachymeter als auch die Verwendung von GPS in der Geodäsie wurden zunächst nur für statische, quasi-statische (Bewegungen von wenigen Zentimetern über einen längeren Zeitbereich) oder „stop-and-go“ Anwendungen konzipiert. Bei ruhenden Zielpunkten erzeugen sowohl die Dauer der Messung sowie die Synchronisation der Subsysteme keine systematischen Fehler in der berechneten Punktkoordinate. Erst in den letzten Jahren wurden solche Messverfahren auch verstärkt zur Beschreibung von Objekt- oder Prozessbewegungen adaptiert. Die Zeit als vierter Parameter der Trajektorie $P(x(t), y(t), z(t))$ ist neben der Messgenauigkeit der Subsysteme ein zentraler Indikator für die Beobachtungsgenauigkeit der Bewegung. Wird eine Trajektorie aus den Rohmessungen abgeleitet, so treten durch eine unzureichende Synchronisation der Subsysteme systematische Fehler auf. Bei Steuerungsprozessen während der Applikation ist insbesondere die Echtzeitfähigkeit zu betrachten. Die Verarbeitung der Messsignale und Durchführung der Rechenalgorithmen in den einzelnen Prozessoren sowie die Zusammenführung und Verwaltung der Einzelbeobachtungen im Subsystem des Datenpools ergeben verschiedene Verzögerungen. Diese Verzögerungsintervalle werden in der Regelungstechnik als Tot- und Bearbeitungszeiten bezeichnet. Im Zusammenhang mit der Verwendung kinematischer Messsensoren werden diese zeitlichen Einflussparameter im Allgemeinen als **Latenzzeit** bezeichnet. Der Ursprung lässt sich hier aus dem lat. Begriffes „latent“ (für vorhanden, aber noch nicht in Erscheinung tretend) ableiten. In der vorliegenden Arbeit wird mit dem Begriff der Latenzzeit konkret die Verzögerung vom Zeitpunkt der tatsächlichen Messung bis zur Verfügbarkeit während der Echtzeitmessung definiert. Je nach Bewegungsart und -geschwindigkeit erzeugen Synchronisationsfehler und Latenzzeiten systematische Positionsfehler bis zu einigen Metern. Abbildung (1.1) stellt in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und der Latenzzeit Δt die maximal auftretenden Positionsfehler grafisch dar. Diese Übersicht kann sowohl zur Abschätzung von Synchronisationsfehlern als auch bei der Fehlerbeschreibung von Latenzzeiten während der Echtzeitanwendungen verwendet werden. So ergibt sich z. B. bei einer typischen Bewegungsgeschwindigkeit im landwirtschaftlichen Ackerbau von $v = 4 \text{ m/s}$ und einer Latenzzeit von $0,18 \text{ s}$ ein systematischer Fehler von maximal (abhängig von der Messanordnung, vgl. Abb. 4.2) $\Delta s = \mathbf{0,72 \text{ m}}$.

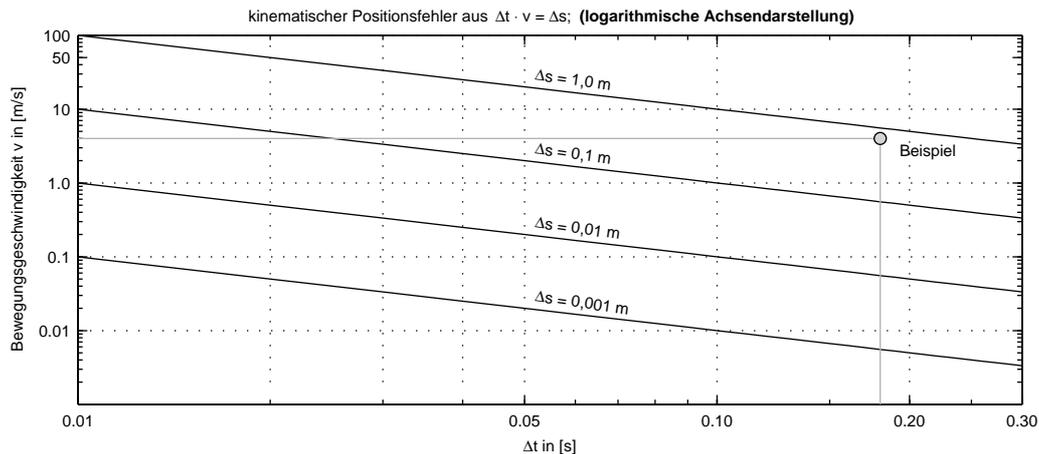


Abbildung 1.2: Abschätzung des maximalen Positionsfehlers in Abhängigkeit von Δt und v

Nahezu alle technischen Prozessabläufe unterliegen gegenwärtig fortschreitenden Automatisierungstendenzen. Zunächst wurde die Automatisierung nur bei technischen, physikalischen oder chemischen Prozessen angewandt, die permanent an einen Ort gebunden waren und hohe Stückzahlen erzeugen. In den letzten Jahren wurden jedoch auch Arbeitsabläufe automatisiert, die diese Kriterien nicht erfüllen. Der selbstständige Ablauf eines Prozesses, der als Umformung und/oder als Transport von Materie oder Informationen nach (DIN 66201) definiert ist, wird durch Stelleinrichtungen (Prozesssteuerung) verändert. Bei der Prozessregelung ist eine wesentliche Voraussetzung das Vorhandensein von geeigneten Messsystemen. Dieser Zustand verändert z. Z. die verschiedenen geodätischen Teilgebiete. In der klassischen Ingenieurvermessung zeigt sich dieser Entwicklungstrend durch das Entstehen neuer Aufgabengebiete. Nicht nur wirtschaftliche und ergonomische Aspekte (Mitwirkung des Menschen auf ein Minimum reduziert, *Mensch-Maschine-Prozesse* [BAYER, 1997]) werden hierbei berücksichtigt, sondern auch Gesichtspunkte des Umweltschutzes und des allgemeinen Ressourcenschutzes. Außerdem werden die groben und zufälligen Fehler des Beobachters bzw. des Maschinenführers minimiert. Mobile Arbeitsmaschinen werden immer häufiger mit integrierter Funktionalität und Intelligenz ausgestattet. Die Kombination von echtzeitfähigen Positionierungssystemen mit Steuerungseinheiten über intelligente Kommunikationsmedien ergibt eine Steigerung der Produktivität, der Qualität sowie eine erhebliche Verbesserung der menschlichen Arbeitsbedingungen.

Gegenwärtig wird der zielverfolgende Servotachymeter oder das GPS zur Ingenieurnavigation, zum Messen von Bewegungen mit Echtzeit-Datenaufzeichnung und zur Steuerung von bewegten Objekten verwendet. Mit so genannten Maschinenleitsystemen (Machine Guidance) werden Baumaschinen entlang vordefinierter Solltrajektorien gesteuert. Die Wechselwirkung zwischen dem Ortungssystem und der Steuerung von Bearbeitungssensoren (Aktorik) über das Kommunikationsmedium stellt hohe Anforderungen und beeinflusst die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems wesentlich. Die Bearbeitungs- und Einbaugeschwindigkeiten reichen von wenigen Metern in der Stunde (Gleisbau) über einige Meter in der Minute (Asphaltfertiger) bis hin zu einigen Metern pro Sekunde (Grader bei Planierungsarbeiten). In den letzten Jahren wurden außerdem durch die Möglichkeiten der mechanisch, pneumatisch und elektronisch regelbaren Komponenten die multikomplexen Arbeitsschritte der Landwirtschaft verändert (z. B. stufenlos regelbares Getriebe bei Traktoren). Der Applikationsbereich des präzisen Ackerbaus, allgemein als Precision Farming bezeichnet, reicht

- vom **Flottenmanagement** (d. h. der Zielsuche und der Einsatzplanung) [Genauigkeitsanforderung etwa ± 10 m],
- über die **Ertragserfassung** während der Erntearbeit (Überlagerung der Daten aus der Ertragskartierung und des Ertragszustandes) [Genauigkeitsanforderung ± 1 m] und
- der **teilschlagspezifischen Flächenbewirtschaftung** (Optimierung der Herbizid-, Pestizid- und Fungizidanwendung im Ackerbau) [Genauigkeitsanforderung ± 1 m] bis hin zur
- **autonomen Schlepperführung** (Feldrobotik) [Genauigkeitsanforderung ± 1 -2 cm].

In einem zweijährigen Forschungsprojekt am Lehrstuhl für Geodäsie und dem Fachgebiet Technik im Pflanzenbau (Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung), beide an der Technischen Universität München, wurde im Rahmen der beiden Teilprojekte „Teilschlagtechnik LT 2“ und „Qualität LQ 3“ des Forschungsverbunds Agrarökosysteme München die Genauigkeit teilschlagvariiertes Applikationsarbeiten verifiziert. Die qualitativen und quantitativen Analysen beziehen sich auf ein entwickeltes und in dieser Arbeit dokumentiertes Orts- und Zeitreferenzsystem. Der systemanalytische Ansatz mithilfe eines Analysewerkzeugs (genormtes physikalisches Kommunikationsprotokoll der Fa. Bosch, Controller Area Network, CAN) zur Untersuchung aller Datenströme im genormten Landwirtschaftlichen Bus System wird im Rahmen einer weiteren Dissertation bearbeitet.

Die vorliegende Arbeit gliedert sich wie folgt:

- Die **Einleitung** beschreibt die Aufgabenstellung und die kinematischen Grundlagen der Arbeit. Der aus der Flugsicherung abgeleitete Begriff „Integrity“ wird auf dieses Themengebiet übertragen. Des Weiteren wird neben dem Stand der Technik das Ziel der Arbeit detailliert erläutert.
- In **Kapitel 2** wird aufbauend auf der UTC-Zeitbasis die Schaffung eines Echtzeit-Erfassungssystems zur Untersuchung und Kombination geodätischer Messsensoren vorgestellt. Damit ist es möglich, Vermessungsgeräte ohne gemeinsame Basis in ein Hybridmesssystem zu integrieren und hinsichtlich ihres Echtzeitverhaltes bei kinematischen Anwendungen zu prüfen.
- **Kapitel 3 und 4** beschreiben zunächst die für den kinematischen Einsatz relevanten technischen Grundlagen des GPS-Systems und des zielverfolgenden Servotachymeters. Hierbei wird besonders auf die zeitabhängigen Einflussgrößen Bezug genommen. Außerdem werden in diesem Kapitel verschiedene kinematische Kalibrierungsverfahren und -strategien vorgestellt. Ziel dieser Beschreibung ist eine Minimierung der systematischen Fehlereinflüsse. Die Messergebnisse sollen nach der Kalibrierung unabhängig von der Bewegung im Bereich der statischen Messunsicherheit liegen. Durch die Angaben und die Modellierung der Latenzzeiten wird die Echtzeitfähigkeit der Sensoren bewahrt.
- Thema des **Kapitels 5** ist die Beschreibung eines Konzepts und zusätzlicher Kalibrierungsverfahren zur Integritätsbewahrung verschiedener kinematischer Messverfahren. Bei kinematischen Messreihen treten stochastische Effekte auf, deshalb werden zunächst konventionelle Filterverfahren wie Tief-, Band- und Hochpassfilter aufgeführt. Zusätzlich bilden rekursive Filter, wie der Kalmanfilter, durch eine der Bewegungsform angepasste Modellbildung (optimale Schätzung durch Mess-, Zustands- und Systemgleichungen) hervorragende Werkzeuge für die Auswertung kinematischer Beobachtungen.
- In der Beschreibung einer Anwendung und deren Verifizierung mittels des integritätswahrenden Referenzmesssystems werden in **Kapitel 6** detailliert die Möglichkeiten eines Precision Farming-Systems dargestellt. Die Ergebnisse zeigen konkrete Beispiele aus den Untersuchungen im FAM-Projekt auf.

1.2 Grundlagen kinematischer Messverfahren

Messverfahren werden als kinematisch bezeichnet, wenn sie in der Lage sind, selbstständig (d. h. ohne zusätzlicher Einwirkung) den zeitabhängigen Ortsvektor einer Bewegung zu erfassen, unabhängig ob es sich um ein-, zwei- oder dreidimensionale Bewegungen handelt. Als Ergebnis wird immer die vollständige mathematische Beschreibung mindestens eines Objektpunktes statt einer Bewegung bezogen auf die Zeit gefordert. Eine wesentliche Unterscheidung liegt in der Größenordnung der auftretenden Geschwindigkeiten. Netz- oder Bauwerksbeobachtungen können als kinematisch aufgefasst werden. Die Bewegungsänderungen innerhalb zwei aufeinander folgenden Messepochen sind hierbei sehr klein. Sie liegen hauptsächlich im Bereich von einigen Millimetern bis wenigen Zentimetern im Jahreszyklus. Die Verformungen werden dabei aus wenigen Messepochen abgeleitet. Man bezeichnet diese Art von Bewegung auch als quasi-statische Bewegung. Hingegen können langsame gleichförmige Bewegungen wie z. B. bei der Steuerung eines Gleitschalungsfertigers oder einer Gleisbaumaschine ($v =$ wenige Meter pro Stunde) als quasi-kinematische Bewegung definiert werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit „schnell“ ablaufenden Bewegungen, bei denen ausschließlich die Beschreibung der Trajektorie von Interesse ist. Ein Bezug zwischen den auftretenden Kräften wird nicht hergestellt.

Anders als bei statischen Messungen sind diese Beobachtungen nicht wiederholbar, d. h. ein entsprechender Objektzustand kann zeitgleich nur einmal aufgenommen werden. Bei einer vollständigen Beschreibung wird die Bewegung immer aus drei Translationen und drei Rotationen (sechs Freiheitsgrade, ggf. mit Berücksichtigung des Maßstabsfaktors) in Abhängigkeit der Zeit betrachtet. Diese geometrischen Größen beschreiben zunächst immer nur die relativen zeitabhängigen Änderungen bezogen auf das Bezugssystem (definiert durch die Art des Bezugssystems, Ursprung und Orientierung). Für diese Arbeit muss lediglich zwischen globalen (geozentrischen) und terrestrischen (z. B. topozentrische) Systemen unterschieden werden. Der jeweilige Ortsvektor \vec{r}_t einer Messepoche schreibt sich in einem kartesischen Bezugssystem zu

$$\vec{r}_t = \begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} = x(t) \cdot \vec{i} + y(t) \cdot \vec{j} + z(t) \cdot \vec{k}. \quad (1.1)$$

Um den Zustand der Bewegung in der näheren Umgebung eines Stützpunktes modellieren zu können, kann die Gleichung (1.1) um den zugehörigen Zeitpunkt t_0 entwickelt werden.

$$x(t_i) = x(t_0) + \dot{x}(t_0)(t_i - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{x}(t_0)(t_i - t_0)^2 + \dots, \quad (1.2)$$

$$y(t_i) = x(t_0) + \dot{y}(t_0)(t_i - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{y}(t_0)(t_i - t_0)^2 + \dots, \quad (1.3)$$

$$z(t_i) = x(t_0) + \dot{z}(t_0)(t_i - t_0) + \frac{1}{2}\ddot{z}(t_0)(t_i - t_0)^2 + \dots \quad (1.4)$$

Hierin ist t_i der Zeitpunkt zum Ortsvektor. Analog kann durch

$$\vec{r} = \vec{v} = \frac{\delta r}{\delta t} = \dot{x}(t) \cdot \vec{i} + \dot{y}(t) \cdot \vec{j} + \dot{z}(t) \cdot \vec{k} \quad (1.5)$$

die Geschwindigkeit und über

$$\vec{r} = \vec{v} = \vec{a} = \frac{\delta v}{\delta t} = \ddot{x}(t) \cdot \vec{i} + \ddot{y}(t) \cdot \vec{j} + \ddot{z}(t) \cdot \vec{k} \quad (1.6)$$

die Beschleunigung \vec{a} berechnet werden. Hierfür ist es ausreichend, wenn nur jeweils ein Zielpunkt am Objekt montiert ist. Die abgeleitete Bewegungsspur einer Objektbewegung ergibt sich somit immer aus den gemessenen Zielpunkten zur Messepoche $\epsilon(t_i)$. Sollen gleichzeitig auch die Rotationen $\omega(t_i)$, $\zeta(t_i)$ und $\xi(t_i)$ bestimmt werden, so kann dies entweder mittels Zusatzsensoren oder aus der Anordnung von drei unabhängigen GPS-Antennen oder drei 360°-Reflektoren erfolgen.

Tachymeter berechnen bekanntlich die Positionen aus der gemessenen und reduzierten Distanzmessung $S_D(t_i)$, der Richtung $r(t_i)$ und dem Zenitwinkel $\zeta(t_i)$. In [CASPARY, 2002] wird zusätzlich der Übergang von den nicht raumfesten Polarkoordinaten in das raumfeste kartesische Bezugssystem ausführlich beschrieben. Außerdem werden in diesem Zusammenhang noch Zylinderkoordinaten und natürliche Koordinaten genannt. In der Praxis werden meist die geografischen oder geodätischen Koordinaten des WGS84-Systems (World Geodetic System 1984) über eine 3-D Helmerttransformation in ein verebnetes System überführt. Die Auswertung und Darstellung der Bewegungsspur kann dann klar in Lage und Höhe getrennt werden. Beim Übergang von WGS84 Koordinaten in ein lokales Bezugssystem können bei den verschiedenen Transformationstools numerische Probleme auftreten. Hierbei kann durch eine Aufteilung der 3-D Helmerttransformation in eine zweistufige Lage- und Höhenkomponente Abhilfe geschaffen werden [LEICA GEOSYSTEMS, 2003].

Von der Art der Bewegung hängt es ab, in welchen Zeitabständen (Zeitdiskretisierung) Δt die Messungen zur eindeutigen Beschreibung des Bewegungsablaufes durchgeführt werden müssen. Zwischen den digitalisierten Zeitpunkten der Abtastfrequenz darf keine Information verloren gehen. Die obere Grenze wird als Nyquist-Frequenz f_N bezeichnet. Nach Nyquist und Shannon gilt folgendes Abtasttheorem:

Bei der Zeitdiskretisierung eines Signals geht keine Information verloren, wenn die Abtastfrequenz mehr als doppelt so groß ist wie die höchste im Signal vorkommende Frequenz,

d. h.

$$2 \cdot f_{max} \leq f_{abtast} \quad \text{oder} \quad f_{max} \leq \frac{1}{2 \cdot \Delta t_{abtast}}. \quad (1.7)$$

Bei gleichförmigen Bewegungen (Einfluss von Schwingungen und Vibrationen wird hier vernachlässigt) muss lediglich gewährleistet werden, dass eine eindeutige Ableitung der Bewegungsbeschreibung aus den diskreten Beobachtungen gewährleistet ist. Mit GPS und zielverfolgenden Servotachymetern sind gegenwärtig Messungen bis maximal 10 Hz möglich.

Datenverarbeitung

Die kinematische Messtechnik endet nicht mit den Beobachtungen, sondern erfordert besondere Auswertetechniken. Zum einen sind verschiedene geometrische Aspekte bei der Auswertung und beim Vergleich solcher Messreihen notwendig. D. h. es muss der Zusammenhang zwischen der einzelnen Anordnung verschiedener Zielpunkte (GPS-Antenne, Reflektoren, Neigungs- oder Richtungssensoren etc.) mit den für die Applikation relevanten Punkten während der Bewegung hergestellt werden. Zum anderen ergibt sich durch die Verarbeitung und Auswertung der Rohmessungen, die bei kinematischen Beobachtungen erzeugt werden, eine weitere Schwierigkeit. Am Beispiel kinematischer GPS-Messungen, die im NMEA-GGA (National Marine Electronics Association 0183) Format [LANGLEY, 1995] registriert werden, ergeben sich sieben relevante Werte pro Messperiode (Zeit, Länge, Breite, Höhe, Messstatus, DOP und Satellitenanzahl). Bei einer Messfrequenz von 10 Hz erzeugt eine Messreihe somit in einer Stunde $3600 \cdot 7 \cdot 10 = 252000$ Werte. Die Verarbeitung und Visualisierung der kinematischen Beobachtungen über mehrere Stunden stellt hohe Anforderungen an ein Auswertetool dar.

Das Softwareprodukt **MATLAB** (Abkürzung von MATrix LABoratory, aktuelle Version 6.5.1 im Dezember 2003) der Firma Mathworks, (<http://www.mathworks.com>) ist eine Interpreter-Software mit Entwicklungsumgebungen für numerische Berechnungen. Die **matrizenoperationale Arbeitsweise** dieses Tools stellt die hoch effiziente Berechnung, Verarbeitung, Analyse sowie Visualisierung großer Datenmengen in Vektor- oder Matrizenform dar und ist deshalb ein ideales Werkzeug zur Auswertung langer Beobachtungsreihen. Merkmale sind die offene Struktur (modifizierbarer Quellcode), die vielfältigen Möglichkeiten zur schnellen grafischen Darstellung sowie die Möglichkeiten der Einbindung von C- oder C++ -Prozeduren. Nahezu alle geodätischen Berechnungen und Auswertungen wurden mit eigenen MATLAB-Funktionen durchgeführt. Zum anderen kann bei der Auswertung kinematischer Beobachtungen wegen der fehlenden Redundanz keine Ausgleichsrechnung im klassischen Sinne angewandt werden. An diese Stelle treten Methoden der Zeitreihenanalyse durch optionale Filtertechniken.

Geodätische Echtzeitsysteme

Die Definition von Echtzeitsystemen unterscheidet sich im Wesentlichen durch die Zusammensetzung der Subsysteme und die Art der Verwendung. So unterliegen alle technischen Prozesse neben ihrer Funktionalität einem bestimmten zeitlichen Verhalten. Bei Steuerungs- oder Regelungsprozessen können auftretende Zeitverzögerungen zur Überschreitung von Toleranzen und somit zu Fehlfunktionen führen. Vor jedem Einsatz kinematischer Messsensoren sind in Abhängigkeit der aufzutretenden Bewegungen solche Latenzzeiten (Definition unter Absatz 3.2.2) zu prüfen und in der Planung der Messaufgabe hinsichtlich der zu erwartenden Fehlern abzuschätzen. Der maximale Fehler $max F_{Pos}$ ergibt sich nach

$$max F_{Pos} = \Delta t \cdot v_{max}. \quad (1.8)$$

Latenzzeiten ergeben sich hauptsächlich aus den Interrupts der einzelnen Prozessoren im Messsensor, der Datenübertragung (Sender, Empfänger, Übertragungsrates und -menge), der Zugriffszeiten, der Berechnungszeiten des geodätischen Algorithmus, der Prozessorressourcen sowie der Art der Funktionalität (z. B. EDM-Messung bei

Tachymeter, oder der Positionsangabe bei GPS). Diese meist unbekanntenen Größen setzen sich aus periodischen und sporadischen Anteilen zusammen. In [DÖLLER, 1994] wird ein vierstufiges Unterteilungsmodell für Echtzeitsysteme angegeben. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung der geodätischen Echtzeitsysteme nach:

1.) **Echtzeitsysteme (Stufe 1 - online):**

Verarbeitung der Messwerte innerhalb des Datenzyklus inkl. Reaktionszeiten des Gesamtprozesses (hängt ab von der Genauigkeitsanforderung der Applikation, vgl. Fehlerabschätzung Abb. 1.1),

2.) **Echtzeitdatenverarbeitung der Prozessdaten (Stufe 2 - online):**

Durchführung aller erforderlichen Rechenoperationen der Prozessdaten innerhalb des Intervalls bis zur nächsten Messwernerfassung, (werden z. B. GPS-Beobachtung mit einer Messfrequenz von 10 Hz aufgezeichnet, so bleiben dem entsprechenden Berechnungs-, Übertragungs-, Auswerte-, Transformations-, Visualisierungs- Anzeige- und Speichervorgang maximal 100 ms)

3.) **Direkte Verarbeitung der Prozessdaten (Stufe 3 - online):**

Prozessdaten werden direkt verarbeitet. Es gibt keine definierte Schranke für die Dauer des Verarbeitungszeitraumes einer Messepoche t_i . Es können also schon Messwerte der Epoche t_{i+1} vorliegen, obwohl die vorhergehende Auswertung noch nicht abgeschlossen ist und

4.) **Post-processing der Prozessdaten (Stufe 4 - offline):**

Hier werden alle Prozessdaten nach Abschluss der Messung zusammengeführt und in einem separaten Auswertetool prozessiert.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vorrangig mit Echtzeitsystemen der Stufe 1. Die genauere Betrachtung von Beobachtungen mit hoher Messfrequenz und langen Auswertungsperioden kann eindeutig der Stufe 2 zugeteilt werden. Je nach Bedarf werden auch die Messdaten mit der in Stufe 4 aufgeführten Datenauswertung prozessiert. Mit dem Begriff „geodätische Echtzeitsysteme“ wird somit die Wechselwirkung zwischen dem Verhalten der verwendeten Instrumente für kinematische Messaufgaben und der Anforderungen der Stellgrößen bei Steuerungs- und Regelungsprozessen bezeichnet. Sowohl der zielverfolgende Servotachymeter, der GPS-Empfänger oder auch das Laserinterferometer verfügen über Latenzzeiten zwischen dem tatsächlichen Messzeitpunkt und der Verfügbarkeit der berechneten, korrigierten und transformierten Messergebnisse. Durch eine exakte Bestimmung solcher Latenzzeiten für die jeweiligen Instrumente kann u. U. mittels einer geeigneten Modellbeschreibung der Bewegung eine Eliminierung dieser systematischen Einflussgrößen erreicht werden.

Die folgende Gesamtübersicht eines geodätischen Echtzeitsystems soll das schematisierte Vorgehen mit den entsprechenden Einflussparametern vom einzelnen Rohmesswert bis hin zur korrigierten Position für kinematische Anwendungen aufzeigen. Die notwendigen Einzelschritte werden in den nachfolgenden Kapiteln genauer beschrieben. Dieses allgemeine Modell kann unabhängig von den verwendeten Messverfahren und der Bewegungsart betrachtet werden.

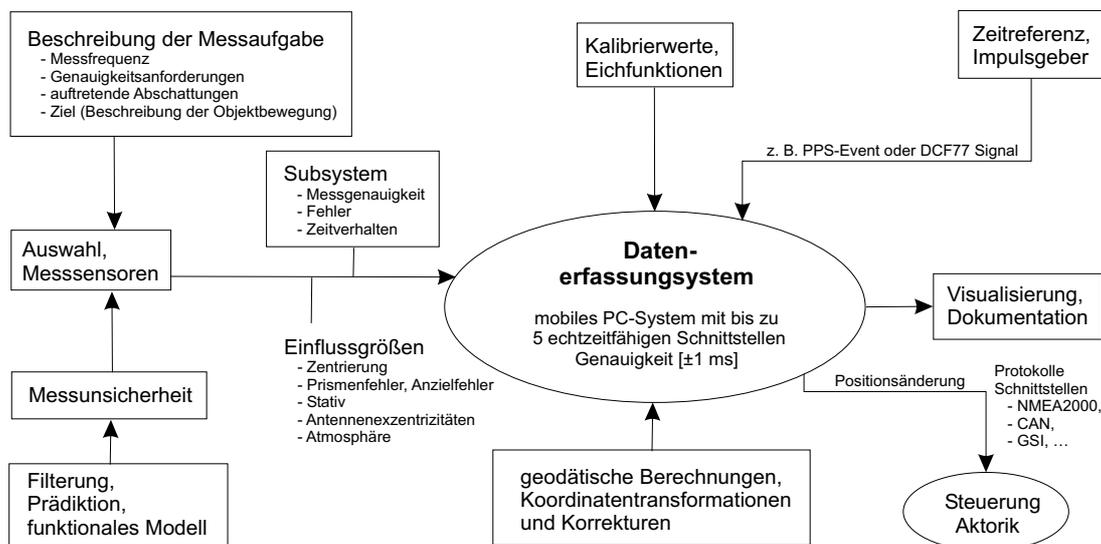


Abbildung 1.3: Gesamtsystem eines geodätischen Echtzeitsystems für Aufgaben der Ingenieurnavigation oder Steuerung

1.3 Integrity durch Kombination verschiedener Messverfahren

Messsysteme zur vollständigen Beschreibung von Bewegungsabläufen können die Anforderungen bzgl. Genauigkeit, Effizienz, Verfügbarkeit und Kontinuität nie uneingeschränkt erfüllen. Am Beispiel der Flugnavigation bei Präzisionsanflügen und automatischen Landungssystemen wird diese Problematik deutlich. Die Flugnavigation mithilfe von terrestrischen Anlagen ist seit Jahrzehnten bewährt und bildet die Grundlage der Flugsicherung der Deutschen Flugsicherung des Luftfahrtbundesamt (DFS). Diese Orientierungshilfe unterteilt sich in ungerichtete Funkfeuer (Non-directional Radio Beacon, NDB), UKW-Drehfunkfeuer (VHF Omnidirectional Range, VOR) und seit 1998 in einzelne Konzepte der Flächennavigation zur Optimierung der Flugrouten und Erhöhung der Kapazität im Luftraum [KÜGLER, 2001]. Seit August 1995 ist in Deutschland zusätzlich das GPS für den Streckenflugverkehr zugelassen. Ende 1996 sind in allen großen deutschen Flughäfen zusätzlich zu den konventionellen Verfahren GPS-gestützte Anflugverfahren installiert worden. Hierbei handelt es sich um Nichtpräzisionsanflugverfahren, bei denen der Pilot eine horizontale, aber keine vertikale Führung erhält. Separate GPS-gestützte Nichtpräzisionsanflüge sind seit 1999 möglich und sollen durch die Anordnung der DFS schrittweise für alle Flughäfen eingeführt werden. Ein Problem der Flugnavigation durch GPS liegt darin, dass z. Z. die für die Präzisionsanflüge geltenden Anforderungen bzgl. Genauigkeit und Integrität noch nicht erfüllt sind. Ziel dieser „Augmentation Systems“ (Aufrüstsysteme) ist es deshalb, nicht nur die Anzahl der Satelliten (Integration von neuen Satelliten im NAVSTAR GPS (vgl. Absatz 4.1) und dem geplanten GALILEO-System durch das European Geostationary Overlay System, EGNOS) zu erhöhen, sondern auch das Gesamtsystem zu überwachen, fehlerhafte Satellitensignale zu erkennen und zu eliminieren sowie die Genauigkeit und Qualität zu erhöhen. Die höchsten Anforderungen an Flugführungssysteme werden bei der Landung unter eingeschränkten Sichtbedingungen gestellt. In [BLOMENHOFER u. JACOB, 1995] werden die Anforderungen an Navigations- und Flugführungssysteme für die Luftfahrt hinsichtlich

- der **Genauigkeit** (Accuracy),
- der **Erkennung von Fehlfunktionen** (Integrity),
- der **Kontinuität der Funktionen** (Continuity of Function) und
- der **Verfügbarkeit** (Availability)

aufgeteilt. Diese vier Anforderungen aus der Luftfahrt lassen sich auf alle Aufgaben zur Überwachung, Führung, Steuerung oder autonomen Navigation von Objekten (z. B. Projekt des Instituts für Regelungstechnik der TU Braunschweig zur autonomen Kraftfahrzeugsteuerung, http://www.ifr.ing.tu-bs.de/de/becker_af.html) übertragen. Neben der Verfügbarkeit und der Genauigkeitsanforderung sind insbesondere die Anforderungen hinsichtlich der unterbrechungsfreien Einsatzwahrscheinlichkeit (Continuity of Function) sowie die Intaktheit (Integrity) der Funktionen von besonderer Wichtigkeit. Der aus der Flugüberwachung abgeleitete Begriff „Integrity“ lässt sich somit im übertragenen Sinne durch das deutsche Wort **integritätswahrend** ersetzen. Es beschreibt die Notwendigkeit der fehlerfreien Zusammenwirkung einzelner Subsysteme zu einem Gesamtsystem bei kinematischen Echtzeitpositionierungen. Bei der Überprüfung kinematischer Messmittel spielt dies eine besondere Bedeutung. In Kapitel 3 und 4 wird der Begriff integritätswahrend für die Verifizierung von GPS-Empfängern und zielverfolgenden Servotachymetern hinsichtlich kinematischer Echtzeitmessungen betrachtet.

Schwierigkeit der Sensorfusion

Grundsätzlich müssen zwei Arten der Sensorfusion unterschieden werden (Erläuterung des Begriffs Fusion verschiedener Messsensoren in Kap. 5). Zunächst sind die Instrumentenhersteller angehalten, die separaten Subsysteme in einem Messsystem hinreichend genau für kinematische Anwendungen zu synchronisieren. Betrachtet man ein GPS-System, so muss von einer ausreichenden Synchronisation der drei wesentlichen Komponenten (Raumsegment, Kontrollsegment und Nutzersegment) ausgegangen werden. Die Zeitskala der Satelliten- und Empfängeruhren sollten identisch sein. Außerdem müssen die Hard- und Softwarekomponenten (Signalempfang, Signalverarbeitung, Positionsberechnung und Berücksichtigung verschiedener Systemmodelle und Korrekturen, Transformationen sowie Datenspeicherung und -ausgabe) im Nutzersegment für kinematische Anwendungen von GPS hinreichend synchronisiert sein. Werden differenzielle Verfahren angewendet, so müssen die Korrekturinformationen innerhalb einer definierten Zeitschranke zur Verfügung stehen. Ein weiterer Fehlereinfluss für Aufgaben der Ingenieurnavigation ergibt sich durch die Totzeit, die während dieser Positionsberechnungen entsteht.

Der zielverfolgende Servotachymeter setzt sich aus verschiedenen unabhängig arbeitenden Subsystemen zusammen. Dieses Messsystem zur genauen Positionierung bewegter Objekte führt sehr komplexe Arbeitsschritte zur Berechnung der Position einer Messepoche durch. Um die Komplexität der einzelnen Subsysteme und deren Wechselwirkungen darzustellen, werden in der nachfolgenden Tabelle die Einflussgrößen aufgelistet. Die zeitkritischen Größen sind hierbei hervorgehoben.

Subsysteme des zielverfolgenden Servotachymeters				
Zielerkennung (ATR)	Richtungs- u. Zenitmesseinheit	Zielverfolgung u. Servomotoren	Elektronischer Distanzmesser	Kompensator
<ul style="list-style-type: none"> - Gesichtsfeld der Kamera (Field of View, VoF) - Auflösung u. Qualität des CCD-Arrays - Lage des CCD-Chips - Bildverarbeitung - Bildfrequenz der Kamera 	<ul style="list-style-type: none"> - Integrität der ATR Informationen - Synchronisation der Teilkreisabgriffe - Transformation des Pixelsystems zum Winkelwert - Interpolationsfehler 	<ul style="list-style-type: none"> - Ableich der Grob- u. Feinzielung - Berechnungs- algorithmen - Ansteuerung der Servomotoren - Beschleunigen u. Abbremsen 	<ul style="list-style-type: none"> - Frequenz - Zykl. Phasenfehler - Phaseninhomogenität - Grob- u. Feinmessung - EDM bei Tracking - Signalstärke - Reichweite 	<ul style="list-style-type: none"> - Restfehler - Abtastung - Ableich - Flüssigkeitsverhalten
Datenpool und Ansteuerung Organisation, Synchronisation und Kommunikation zwischen den Subsystemen, zusammenfügen aller geodätischen Berechnungen u. Korrekturen, Datenmanagement, -ausgabe und -speicherung				

Tabelle 1.1: Einflussfaktoren beim zielverfolgenden Servotachymeter (**zeitkritische Komponenten hervorgehoben**)

Die Schwierigkeit hierbei ist die Realisierung einer hinreichenden Synchronisierung dieser Subsysteme zueinander. Durch Verwendung der Abbildung (1.1) und der Formel (1.8) kann der Anwender die zu erwartenden Positionsfehler abschätzen. Bedingung hierfür ist jedoch, dass sowohl die einzelnen zeitlichen Verzögerungen zwischen den tatsächlichen Messungen (Richtungs-, Zenitwinkel-, Distanzmessung und Restneigungen), der Berechnung, der Reduktion bzw. der Korrektur, der Ausgabe aller Werte einer Messepoche sowie der Geschwindigkeit der Bewegung bekannt sind. In [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000] wird ein Verfahren und die mathematische Berechnung von zeitlichen Verzögerungen zwischen der Richtung und Distanzmessung vorgestellt.

Eine weitere Schwierigkeit ergibt sich, wenn unterschiedliche Messsensoren kombiniert werden sollen. Existieren Trigger-Schnittstellen, so müssen lediglich die entsprechenden Latenz- und Ansprechzeiten bekannt sein. Fehlt eine solche Schnittstelle durch externe Impulse, so können unterschiedlich arbeitende Messsensoren nicht einfach kombiniert werden. Zur Synchronisation ohne Hardwaremodifikation seitens des Herstellers bedarf es zunächst einer übergeordneten und einheitlichen Basis. Eine solche Synchronisationsgrundlage wird idealerweise durch eine einheitliche Zeitbasis dargestellt. Da die Kommunikations- und Datenregistrierungsschnittstelle der Messsensoren immer ein PC bildet, muss auch die Zeitbasis fehlerfrei, d. h. ohne Totzeiten mit diesem Rechner erfasst werden. Werden nur Messdaten ohne Bezug zu anderen Messsystemen benötigt, so werden diese meist nur auf PC-Karten aufgezeichnet. Um bei schnelleren Bewegungen von mehreren m/s keine systematischen Fehleranteile mit einem erstellten Hybridmesssystem zu erhalten, müssen die Verfügbarkeit und die Registrierung dieser Zeitbasis unterhalb dem Millisekundenbereich liegen. Des Weiteren müssen alle Ansprech-, Mess-, Kommunikations-, Übertragungs- und Totzeiten sowie die Echtzeitstabilität modellierbar sein. Da jede Änderung im Messprogramm und in der Instrumentenkonfiguration (z. B. Kompensator ein/aus) eine sofortige Auswirkung auf diese Größen erzeugt, muss dies durch die Korrektur mittels einer adäquaten Eichfunktion berücksichtigt werden.

Ein solches auf der einheitlichen Zeitbasis synchronisiertes Hybridmesssystem aus einem „Real Time Kinematic GPS (RTKGPS - Begriff der Trägerphasenmessung in Echtzeit)“ und einem zielverfolgenden Servotachymeter ist in der Lage, durch Plausibilitätskontrollen in gegenseitiger Wechselwirkung Fehler zu erkennen. Der in der Flugüberwachung verwendete Begriff „**Integrity**“ findet in diesem Zusammenhang eine weitere Anwendung. Anders als z. B. bei der „Integrity“ von GPS-gestützten Mappingverfahren, bei denen die Richtigkeit der Lokalität durch die Überprüfung der Objekte in der Örtlichkeit kontrolliert werden muss, kann hier die Vermeidung

von Fehlfunktionen (oder aus der direkten Übersetzung *Intaktheit*) des Messensors durch das Referenzsystem kontrolliert werden. Das GPS-System kann sich bei genügender Anzahl von Satellitensignalen nach dem RAIM-Konzept (Receiver Autonomous Integrity Monitoring) selbstständig kontrollieren.

Ein weiteres Beispiel der Synchronisationsproblematik stellt die Verwendung unterschiedlicher satellitengestützter Positionierungssysteme in einem Empfänger dar. Bei der gleichzeitigen Verwendung von der NAVSTAR GPS- und der GLONASS-Technik in einem Empfänger ergeben sich neben der Problematik der unterschiedlichen Signalstruktur und unterschiedlichen Koordinatensysteme (WGS84 und PZ-90) vor allem auch Schwierigkeiten wegen den unterschiedlich verwendeten Zeitsystemen (UTC bei NAVSTAR GPS und GLONASS bei GLONASS). Die Realisierung wurde z. B. in den Produkten der Fa. Topcon (<http://www.javadgps.com>) durchgeführt.

1.4 Bisherige Arbeiten

Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema kinematische Messmittel existieren erst seit etwa zwei Jahrzehnten. Einzelne Forschungseinrichtungen wie z. B. an der TU Wien [KAHMEN, 1984] oder der Sonderforschungsbereich „Hochgenaue Navigation“ an der Universität Stuttgart [BAYER, 1992] arbeiteten in den achziger Jahren an den Grundlagen der Integration einer digitalen Kamera zur automatischen Zielerfassung und -verfolgung mit Tachymetern. Das erste Projekt mit dem Namen „GEOROBOT“ wurde am Geodätischen Institut der Universität Hannover begonnen [KAHMEN u. SUHRE, 1983] und später auf „GEOROBOT II“ erweitert [KAHMEN u. STEUDEL, 1988]. 1982 wurde an der ETH Zürich ein Forschungsprojekt mit der Bezeichnung „TOPOMAT“ gegründet. 1986 wurde der erste Vermessungsroboter „TOPOMAT“ zur Automatisierung von topografischen Geländeaufnahmen und für Aufgaben der Katastervermessung erstellt [DEUMLICH u. STAIGER, 2002].

Der erste zielverfolgende Servotachymeter mit automatischer Zielpunkterfassung wurde im Jahre 1990 von der Fa. Geotronics (heute Spectra Precision) mit dem Gerät Geodimeter 4000 serienmäßig angeboten (1987 Geodimeter 140 T). Der Einsatz dieser „Ein-Mann-Station“ beschränkte sich zunächst hauptsächlich auf Absteckungsaufgaben und Einzelpunktaufmaße. Mitte der neunziger Jahre wurden die verschiedenen zielverfolgenden Servotachymeter auch für Aufgaben zur Bestimmung der Trajektorie von bewegten Objekten angepasst. In der Anfangszeit der elektronischen Tachymeter waren die Sende- und Empfangseinrichtungen zur Winkel- und Distanzmessung parallel versetzt [DEUMLICH u. STAIGER, 2002]. Die Technik des Infrarot-Autokollimators (Patent der Fa. Leica Geosystems), d. h. einer koaxialen Anordnung der Optik zur Distanz- und Winkelmessung ist heute in vielen Instrumenten realisiert. In [STAIGER, 1997] wird z. B. die koaxiale Anordnung und das Funktionsprinzip am Beispiel des Instruments TOPCON AP-L1A dargestellt.

In [STAIGER, 1998] wurde zum ersten Mal die Existenz systematischer Positionsfehler bei Beobachtungen mit einem zielverfolgenden Servotachymeter an einem Sollkreis veröffentlicht. Die in Staiger dargestellte Abbildung (1.4) stellt die Verteilung der Kreisablagevektoren ohne Interpretation der Ursache dar.

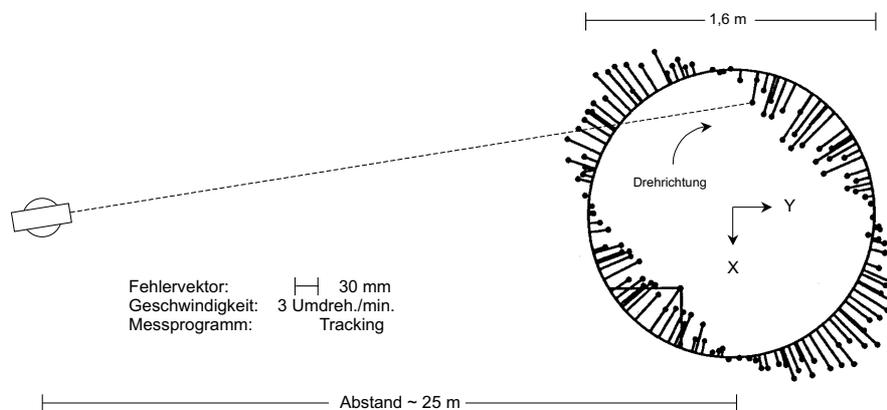


Abbildung 1.4: kinematische Messungen an einem Sollkreis mit dem Leica TCA 1800, [STAIGER, 1998]

Eine Abschätzung der möglichen Genauigkeit und Deutung der systematischen Kreisablagen als Latenzzeit zwischen der Winkel- und der Streckenmeseinheit im zielverfolgenden Servotachymeter wurde erstmalig in

[KUHLMANN, 1999] beschrieben. Ein genaues Verfahren zur Bestimmung dieses Zeitoffsets mit Korrekturformeln für Echtzeitanwendungen wurde schließlich in [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000] veröffentlicht. Außerdem sind zahlreiche Arbeiten zur Leistungsfähigkeit (z. B. [HENNES, 1999]), zum Einfluss der einzelnen Komponenten (z. B. [INGENSAND, 2001]) und zu der jeweiligen Wirkungsweise der verschiedenen Instrumententypen publiziert z. B. [DEUMLICH u. STAIGER, 2002]).

Verschiedene wissenschaftliche Arbeiten und Standardwerke zu Thema GPS (siehe hierzu [WELLS, 1986], [SEEBER, 1993], [KAPLAN, 1996] oder [HOFFMANN-WELLENHOF, et al. 2001]) sind seit dem Beginn der Positionierung mit satellitengestützten Systemen verfasst worden. Seit der Abschaltung von „Selective/Availability“, (SA) drängen immer mehr GPS-Empfänger unterschiedlicher Genauigkeit auf den Markt. Das „Institute of Navigation, ION“ ist weltweit die einzige Organisation, die internationale Standards zu Genauigkeitsuntersuchungen veröffentlicht hat. Dieser Standard der „Satellite Division des ION“ bezieht sich auf die Spezifikation des „US Department of Defence“. Die „ION STD 101 Recommended Test Procedures for GPS, Revision C, (Übersicht unter <http://www.ion.org/publications/std101.cfm>)“ beinhaltet für die statische Prüfung von GPS-Empfängern folgende Punkte:

- Einführung und Abgrenzung des Standards,
- Definition der verwendeten Begriffe,
- Initialisierungsdauer bis zur ersten Verfügbarkeit einer Position (Initialized Time To First Fix, Init TTFF),
- Warmstart bis zur ersten Positionsverfügbarkeit (Warm Start Time To First Fix, Warm TTFF),
- Zeit für die Positionsverfügbarkeit nach dem Signalverlust (Reacquisition Time, REAQ),
- Statische stand-alone Genauigkeit (Static Navigation Accuracy),
- Dynamische (gemeint ist kinematische) stand-alone Genauigkeit (Dynamic Navigation Accuracy) und
- Signal-Interferenz (Radio Frequency Interference, RF-I).

Der „ION STD 101-Standard“ beschränkt sich lediglich auf einige Grundlagen zur Prüfung, Darstellung und Vergleichbarkeit von GPS-Genauigkeitsuntersuchungen (vgl. Resultate in Absatz 3.3). Aspekte zu den Korrekturinformationen, der Signalempfangsqualität, den integrierten Signalfiltern, der Echtzeitfähigkeit und Interpolationen bleiben unberücksichtigt. Das ION bezeichnet diesen Prüfstandard als Grundlage. Genauigkeitsaspekte für Militär-, Land- oder Wasseranwendungen sollen dieses Rahmenwerk als Bezug adaptieren. So wurde z. B. in [EHSANI, 2002] eine ASAE-Empfehlung (Society for engineering in agriculture, food and biological systems, <http://www.asae.org/>) für kinematische Genauigkeitsuntersuchungen bei landwirtschaftlichen GPS-Anwendungen definiert:

- Testumfang
(Der Test sollte unter landwirtschaftlichen Bedingungen, d. h. Wendevorgänge, Kurvenfahrten, stop-and-go-Fahrten sowie unter realen Geschwindigkeiten der Bodenbearbeitung durchgeführt werden),
- Testdauer
(eindeutige Beschreibung der Versuchsdauer, idealerweise an zwei unabhängigen Tagen zu jeweils 12 Stunden),
- Anforderungen des Prüfberichts
(Datum, Satellitengeometrie und -zustand, DOP-Werte, Prüfdauer, Wetterverhältnisse, Entfernung der Referenzinformation, Empfängerkonfiguration und verwendete Firmware),
- Datum und Transformationen
(Beschreibung des Bezugsrahmens, der Projektion und Transformation in ein Auswertesystem, Angabe der Geometrie),
- Antennenabstand
(werden mehrere GPS-Empfänger gleichzeitig untersucht, so soll ein Mindestabstand zwischen den Antennen zur Vermeidung von Interferenzen eingehalten werden),

- Referenzinformation
(Bei Untersuchungen ohne bekannte Sollinformation sollte die Referenzinformation, z. B. RTKGPS genauer sein als der Prüfling.),
- Richtlinien für mobile Tests (On-Vehicle)
(Beschreibung der Bewegungsspur, Länge, Form, Störeinflüsse wie Bäume, Starkstromleitungen) und
- Beschreibung von Bewegungssimulatoren
(Antrieb, Konstanz der Geschwindigkeit, Führungsgenauigkeit, Empfehlung für Spurlänge).

Aspekte zum Echtzeitverhalten und der Antennenphasenzentrumsvariation sind in dieser Empfehlung des ION nicht berücksichtigt. Der Internationale GPS Service (IGS) befasst sich jedoch mit der Problematik der Antennenphasenzentrumsvariation in einem eigenständigen IGS-Standard [GÖRRES, 2001].

Allgemeine GPS-Genauigkeitsstandards als Empfehlung für geodätische Anwendungen sind nicht bekannt. Die Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. (DLG) tritt in Deutschland als anerkannte Prüfinstitution (Lebensmittel, Tierhaltung und landwirtschaftliche Maschinen) auf. Sie versucht einen nationalen Standard für GPS-Empfänger für Aufgaben der Zug- oder Bodenbearbeitungsmaschinen zu installieren. Derzeit werden Tests an der Versuchseinrichtung der DLG in Groß-Umstadt bei Frankfurt durchgeführt.

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten (z. B. [LACHAPELLE u. SCHWARZ, 1990]) zum Thema Kinematik im Vermessungswesen wurden publiziert. Der Deutsche Verein für Vermessungswesen e. V. (DVW) veröffentlichte in der Schriftenreihe 22/1996 zahlreiche Arbeiten zum Thema kinematische Messmethoden. In [CASPARY, 2002] wurden die mathematischen Zusammenhänge zusammengefasst. Außerdem wurden z. B. in [HUEP, 1986] oder [WANG, 1997] Methoden zur Auswertung kinematischer Beobachtungsreihen behandelt.

1.5 Ziel der Arbeit

Gegenwärtige Trends lassen erkennen, dass eine gemeinsame Kommunikationsplattform zur Synchronisation verschiedener Messsysteme für kinematische Anwendungen von seiten der Hersteller in den nächsten Jahren nicht angestrebt wird. Der allgemeine Bedarf an solch hoch präzisen Hybridmesssystemen für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie ist hierfür noch zu gering. Aus diesem Grund beschränkten sich der Forschungs- und Entwicklungsbereich solcher Systeme lediglich auf wissenschaftliche Fragestellungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein echtzeitfähiges Hybridmesssystem mit maximaler Verfügbarkeit, d. h. einer Minimierung der horizontalen und vertikalen Abschattungen zu schaffen. Außerdem darf die in Echtzeit gemessene und verfügbare Positionsinformation jeder Epoche nicht durch die Bewegungsart und -geschwindigkeit beeinflusst werden. Hierbei wird eine komplette Kenntnis aller Orts- und Zeitkomponenten benötigt. Das Ergebnis des Hybridmesssystems ist immer ein gemeinsames Koordinatentripel inkl. einer genauen Zeitinformation. Die separaten Fehlereinflüsse, verursacht durch die einzelnen Messsensoren, werden dadurch weitgehend minimiert. Mit dem erstellten echtzeitfähigen Hybridmesssystem steht somit ein Gesamtsystem zur Beobachtung verschiedener Bewegungen im Zentimetergenauigkeitsbereich zur Verfügung. Idealerweise können sich die verschiedenen Messsysteme auch gegenseitig stützen. So kann z. B. beim Signalabriss des zielverfolgenden Servotachymeters zum Prisma die Positionsinformation durch einen GPS-Empfänger wieder selbstständig aufgefunden werden.

Im Wesentlichen existieren neben einzelnen Sonderanwendungen wie z. B.

- einer Trajektorienbestimmung von Schiffsbewegungen [CZAJA, et al., 2001],
- dem Sonderforschungsprojekt „Multi-Sensor Systeme für die Kontrolle und Produktion von Schienenwägen für Hochgeschwindigkeitsbahnen“ der angewandten Geodäsie und Ingenieurgeodäsie der TU Wien (<http://info.tuwien.ac.at/histu/inst/fp/0001281503.html>),
- dem Projekt „satellitengestütztes Tagebauaufmaß und Massenbilanzierung (SATAMA, [BULOWSKI, 2000])“ der RWE Rheinbraun AG oder
- die verschiedenen Systeme der Maschinenführung in Tunnelvortrieb

nur die beiden Hauptanwendungsbereiche der Baumaschinensteuerung und des präzisen Ackerbaus. Bei Genauigkeitsanforderungen von einigen Zentimetern einzelner Teilbereiche der Maschinenführung (Straßen, Gleis- oder Flughafenbau) kommen vorrangig nur RTKGPS-Systeme zum Einsatz. Einige Komplettsysteme wie z. B. die Gradersteuerung existieren bereits. Bei den verschiedenen Einbausritten, z. B. mit dem Asphaltfertiger oder mit dem Gleitschalungsfertiger, werden wegen der hohen Genauigkeitsanforderung vor allem in der Höhenkomponente hauptsächlich zielverfolgende Servotachymeter verwendet. Kombinierte Systeme existieren derzeit nicht.

Bei Precision Farming-Systemen werden neben INS, elektronischen Kompassen, Radarsensoren und Radumdrehungssensoren hauptsächlich „low cost“ GPS-Sensoren eingesetzt. In dem unter Absatz (1.1) beschriebenen Forschungsprojekt FAM wird der Schwerpunkt auf die Applikation des teilschlagspezifischen Herbizid-, Pestizid- und Fungizideinsatzes sowie die Ertragskartierung gelegt. Die Positionsinformationen aus den Pseudorange-korrigierten DGPS-Empfängern werden dem Kommunikationssystem und der Aktorik zur Verfügung gestellt. Ziel des Forschungsprojekts ist es, mit dem in der Arbeit beschriebenen Referenzmesssystem die

- Untersuchungen der realisierbaren Genauigkeit von Ortungs- und Applikationstechnik,
- Untersuchungen technischer Reaktionszeiten von Teil- und Gesamtsystemen und
- Ableitung von Kennwerten für zukünftige hoch genaue Precision Farming Systeme

mit dem genormten LBS durchzuführen.

Der separate und vor allem der kombinierte Einsatz kinematischer Messsensoren zur Erfassung einer Trajektorie bewegter Zielpunkte erfordert neben der Bestimmung der **Leistungsfähigkeit und Synchronisation der verwendeten Subsysteme** und der Berücksichtigung **kinematischer Auswertestrategien** eine umfassende **Kalibrierung hinsichtlich der Echtzeitanwendung** in Abhängigkeit der Bewegungsart und -geschwindigkeit. Somit ist man in der Lage, bewegungsabhängige Einflussparameter durch geeignete Modellbildung und die Formulierung von Eichfunktionen zu minimieren und somit systematische Fehler weitgehend zu eliminieren.

Um diese Arbeit durchzuführen, werden Werkzeuge und Untersuchungen wie

- ein Echtzeiterfassungssystem (Kap. 2),
- kalibrierte Einzelsensoren (Kap. 3 und 4) sowie
- eine Strategie zur Sensorfusion und Auswertung kinematischer Beobachtung (Kap. 5).

benötigt. Die Ergebnisse werden anschließend im Kap. 6 am Beispiel der Kalibrierung eines Precision Farming-systems dargestellt.

2 Schaffung einer einheitlichen Zeitbasis

Nahezu alle Lebensräume werden durch das Phänomen Zeit beeinflusst bzw. dominiert. Nach Einstein (1879 - 1955), dem Begründer der Relativitätstheorie, ist die Zeit

„ein Maß, in dem wir die Ergebnisse vor- und hintereinander zeitlich zuordnen können“.

Ein andermal antwortet er auf die gleiche Frage der Zeitdefinition ganz lapidar,

„Zeit ist das, was man auf der Uhr abliest“.

Die physikalische Zeitmessung beruht auf einer allgemeinen Konvention, die als Definition eingeführt wird. Sie dient als fundamentale Größe für viele wissenschaftliche Untersuchungen. Erst eine Zeitskala ermöglicht es, sowohl den Zeitpunkt (Epoche eines Ereignisses) als auch das Zeitintervall, d. h. den Zeitvergleich (Oszillation zweier unabhängiger Uhren) zwischen zwei Ereignissen qualitativ anzugeben. Die Datierung von Zeitpunkten oder Zeitintervallen erfordert eine einheitliche und stabile Maßeinheit. Dies wird allgemein als Zeithaltung bezeichnet. Zur Aufstellung einer Zeitskala ist die Beziehung zwischen der Zeiteinheit und einem beobachteten periodischen oder kontinuierlichen Vorgang herzustellen. Des Weiteren müssen ein eindeutiger Anfangspunkt, die Zählrichtung und die Dauer der Zeiteinheit bestimmt sein. Im Hinblick auf die bei der Zeitmessung benutzten Uhren ist es außerdem notwendig, dass diese Ergebnisse von kurzperiodischen Änderungen frei sind. Dadurch können verschiedene zeitvariable Informationen im Sinne der Gleichzeitigkeitsdefinition betrachtet werden. Der Begriff der Gleichzeitigkeit ist mathematisch definiert als Gleichheit der Zeitziffer an verschiedenen Raumpunkten. Zur Herstellung der Gleichheit benötigt man jedoch eine Vorschrift, etwa ein Signal als Bezifferungsverfahren sowie ein Verbreitungsverfahren.

2.1 Grundlagen der verschiedenen Zeitsysteme

Zur Festlegung von Zeitsystemen sind stabile periodische Vorgänge geeignet. Als natürliche Zeitskala bietet sich zunächst die Dauer der Erdrotation (Zeit für eine komplette Erdumdrehung) an. Die Definition der *Sternzeit* und des *Sterntages* (Zeitraum zweier aufeinander folgender Kulminationen des Frühlingspunktes) ergibt sich durch die Beobachtung von Zeitsternen, die in der Nähe des Himmelsäquators liegen und deren Koordinaten mit höchster Genauigkeit bekannt sind. Dieses hauptsächlich in der Astronomie benutzte Zeitsystem definiert sich durch den Frühlingspunkt als Nullmarke. Die *Sonnenzeit* begründet sich nicht nach der Orientierung der Sterne, sondern nach der Dauer einer Erdumrundung um die Sonne. Da wegen des ungleichmäßigen Laufes der Erde in ihrer Bahn und der notwendigen Projektion der Sonnenposition auf den Äquator die Sonne eine ungleichmäßige Bewegung beschreibt, ist der wahre *Sonntag* kein konstantes Zeitmaß. Man führt daher eine fiktive mittlere Sonne ein, die gleichmäßig entlang des Himmeläquators umlaufen wird. Bis vor wenigen Jahrzehnten erachtete man die Erdrotation als zuverlässige und genaue Vergleichsbewegung. Schwankungen in der Rotationsgeschwindigkeit und in der Lage der Rotationsachse in Bezug auf den Erdkörper (sog. Polschwankungen) führen dazu, dass weder die Sternzeit noch die Sonnenzeit eine gleichförmige Basis für eine genaue Zeitskala darstellen. Um eine präzise Weltzeit (*Universal Time, UT*) realisieren zu können, ist es notwendig, an den beobachteten Zeiten Korrekturen dieser Schwankungen anzubringen. *UT* wurde per Definition 1926 als Ersatz für die „*Greenwich Mean Time, (GMT)*“ eingeführt. Für die jahreszeitliche Schwankung lässt sich daher auf Grund des periodischen Charakters eine empirische Formel aufstellen. Dieses Korrekturglied wird mit ΔT_S (S von Seasonal Variations) bezeichnet. Damit ergeben sich drei verschiedene Typen der Weltzeit *UT*:

- *UT0 (UT)* - aus den Gestirnsbeobachtungen abgeleitete Weltzeit, wobei *UT* auf den Nullmeridian (Greenwich) und *UT0* auf den Beobachtungsstandort (Zeitzone) bezogen ist,
- *UT1* - mittlere Sonnenzeit am nullten Längengrad, resultiert aus $UT0 + \Delta T_P$, um die Polschwankung (durch den internationalen Polschwankungsdienst überwacht) verbesserte Weltzeit; dieses Zeitsystem bezieht sich somit auf die wahre Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation (Bestimmung durch den International Earth Rotation Service, IERS),
UT1 wird heute oft als „Winkelgröße“ für Transformationen zwischen verschiedenen Referenzsystem benutzt und

- $UT2$ - resultiert aus $UT0 + \Delta T_P + \Delta T_S$,
dabei wird $UT1$ um die jahreszeitliche Schwankung der Rotationsgeschwindigkeit verbessert.

$UT2$ stellt eine gute Approximation für die gleichförmige Weltzeit dar. Als gleichförmiges Zeitmaß wird heute für physikalische Zeitmessung allgemein eine *Atomzeit* herangezogen. Deshalb verliert $UT2$ immer mehr an Bedeutung, während für die astronomisch-geodätische Ortsbestimmung das Zeitsystem $UT1$ maßgebend ist. Auf der XI. Generalversammlung der Internationalen Astronomischen Union (IAU) wurde 1958 die unabhängige zeitvariable *Ephemeridensekunde* (ET) aus der Theorie der Himmelsmechanik definiert. ET ist die Beschreibung der Zeit aus den Örtern der Himmelskörper. Sie wird durch Vergleich mit der Position eines Himmelskörpers und den Ephemeriden basierend auf der Newcombschen Theorie der Sonne, Mond und Planeten bestimmt und ist losgelöst von der ungleichmäßigen Erdrotation. Um den Vorteil der hohen Zeitkonstanz der Atomuhren nicht nur im Sinne einer Zeithaltung, sondern auch direkt zum Zeitsystem nutzen zu können, wurde die Atomzeitsekunde so definiert, dass sie mit der ET möglichst gut übereinstimmt. ET wurde 1984 von der dynamischen Zeit (Temps Dynamique Terrestre, TDT) abgelöst. Dieser Zeitskala liegen relativistische Bewegungsgleichungen zugrunde. Heute wird TDT nur noch als Terrestrial Time (TT) bezeichnet (z. B. im ITRF2000 verwendet). Zur Vollständigkeit der Zeitskalen sind des Weiteren die baryzentrische Koordinatenzeit Temps Coordonné Barycentrique (TCB) und die geozentrische Koordinatenzeit Temps Coordonné Geocentrique (TCG) zu nennen.

Ab 1965 wurde die koordinierte Weltzeit (**Universal Time Coordinated, UTC**) auf Vorschlag des CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) eingeführt. Sie ist eingebettet in das internationale Einheitensystem SI (Système International d'Unités). Die Abweichungen zwischen UTC und UTC_k werden als laufende Zeitvergleiche aller weltweiten Observationsstationen bestimmt. Der Index k steht hierbei für die individuellen Stationen. Die Variation k der verschiedenen Stationen wird in einem vierwöchigen Zyklus im so genannten „Bulletin Circular T des Bureau International des Poids et Mésures (BIPM)“ über

$$\Delta t_{k,i} = (UTC_k - T_{GPS})_{BIPM,i} - (UTC_k - T_{GPS})_{k,i} \quad (2.1)$$

bestimmt und veröffentlicht.

Laboratorium k	Periode i 2001/2002	Anzahl der Common Views	Standardab- weichung in [ns]	tägliches Rausch- Niveau in [ns]
OP (Paris)	26. Dez. - 8. Jan.	557	2,5	0,5
USNO (Washington)	16. - 22. April 02	1120	3,3	0,7
NIST (Boulder)	29. - 6. Mai 02	139	2,9	1,2
PTB (Braunschweig)	14. - 19. März 02	183	3,2	0,3
IEN (Turin)	12. Feb. - 4. März 02	236	3,8	0,5
ROA (San Fernando)	8. - 11. März 02	96	3,7	1,0

Tabelle 2.1: Beispiel einiger Stationen lokaler Zeitobservatorien - Ablagen UTC zu UTC_k

Durch Telekommunikationssatelliten können diese Variationen exakt bestimmt werden. Streng genommen ist bei jeder Angabe der Zeitinformation immer der Index k anzugeben. Nach [ICD-GPS, 1997] beträgt die Abweichung der GPS-Zeit T_{GPS} zu UTC_k , abgesehen von der ganzzahligen Differenz der Schaltsekunden (z. Z. 13 s), maximal 90 ns. Der Offset zwischen der GLONASS-Zeit $T_{GLONASS}$ und UTC_{SU} (State Time and Frequency Service of Russia, Moskau) soll stets geringer als eine Millisekunde sein.

Seit 1967 wird die Zeit nach der Generalkonferenz für Maß und Gewicht in Paris (BIMP) durch die Definition über eine atomphysikalische Konstante festgelegt. Atomare Größen weisen eine hohe zeitliche Konstanz auf und lassen sich beliebig oft reproduzieren. Gemäß dieser Definition ist eine Sekunde durch 9192631770 Perioden der Strahlung, beim Übergang des Caesium Nuklids ^{133}Cs zwischen zwei Hyperfeinstrukturzuständen festgelegt [SEIDELMANN, 1992]. Die elektromagnetische Strahlung einer charakteristischen Frequenz wird von den Caesiumatomen ausgesendet oder absorbiert, wobei das Atom von seinem ursprünglichen Energiezustand zum nächsten übergeht. Das deutsche Zeitlaboratorium der Physikalisch Technischen Bundesanstalt (PTB) hat 1969

die erste Atomuhr CS1 (Caesium-Eins) in Betrieb genommen. Eine genaue Funktionsbeschreibung dieser Atomuhr kann unter (http://www.ptb.de/de/blickpunkt/_infoszurzeit.html) nachgelesen werden. Primäre Atomuhren unterscheiden sich von herkömmlichen Atomuhren dadurch, dass ihre frequenzbestimmenden Betriebsparameter außerordentlich genau bekannt sind. In den verschiedenen Zeitlaboratorien wird weltweit versucht, diese äußeren Unsicherheiten zu minimieren und zu reproduzieren. Die PTB besitzt vier solcher primärer Atomuhren CS1 bis CS4. Mit einer statistischen Wahrscheinlichkeit von 2σ wird die Genauigkeit der Zeitverbreitung durch $\pm 1,2 \cdot 10^{-14}$ s angegeben. Umgerechnet bedeutet dies eine Abweichung von einer Sekunde in 2,5 Millionen Jahren. Mit einer so genannten Caesium-Fontäne, bei der die Atome auf einer lasergekühlten, ballistischen Flugbahn ein Mikrowellenfeld durchqueren, kann die Genauigkeit nochmals um den Faktor 10 gesteigert werden. Hierzu laufen z. Z. verschiedene Entwicklungen in den weltweiten Zeitlaboratorien.

Die **internationale Atomzeit TAI** (Temps Atomique International) ist eine koordinierte Zeitskala im Sinne der allgemeinen Relativitätstheorie, definiert in einem geozentrischen Bezugssystem. Die SI-Sekunde wird hierbei auf das rotierende Geoid durch den Korrekturparameter $-1,09 \cdot 10^{-16}$ (h/m) mit der Variablen h als Höhe über dem Geoid reduziert. Der Anfangspunkt von TAI wurde willkürlich auf den 01.01.1958 um 0:00 Uhr festgelegt. Bis zum Ende des Jahres 1999 vergingen somit exakt $(32 \cdot 365 + 10 \cdot 366) \cdot 24 \cdot 3600 = 15340 \cdot 86400 = 1325376000$ Atomsekunden. Die Erde hatte jedoch zu diesem Zeitpunkt die 15340 Erdumdrehungen noch nicht ganz vollendet. Dazu fehlen ihr etwa 31,3 Sekunden oder im Drehwinkel der Erde ausgedrückt, etwa $0,13^\circ$. Auf Anweisung des IERS werden deshalb immer wieder Schaltsekunden aus der Differenz zwischen UT1 und UTC kleiner 0,9 s (in der Realität zwischen 0,4 bis 0,6 s, Ende Mai 2003 = -0.3739 s) zum Abgleich eingeführt. Am 01.01.1972 wurde der Anfangspunkt der UTC-Zeitskala festgelegt. Die Differenz zu diesem Zeitpunkt zwischen TAI und UTC wurde mit 10 Sekunden berücksichtigt. Die Differenz $TT - TAI$ wurde für den 1.1.1977, 00:00 Uhr auf 32,184 Sekunden festgelegt und bleibt nahezu konstant. 1975 wurde in der 15. Generalkonferenz für Maß und Gewicht die UTC-Zeitskala als Grundlage der bürgerlichen Zeit und deren Aussendung von Zeitzeichen und Normalfrequenzen festgelegt. Der aktuelle Wert der Differenz TAI-UTC kann im Bulletin C des IERS unter (<http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/>) entnommen werden. Die folgende Abbildung stellt den Zusammenhang der wichtigsten Zeitsysteme für geodätische Beobachtungen als Übersicht dar.

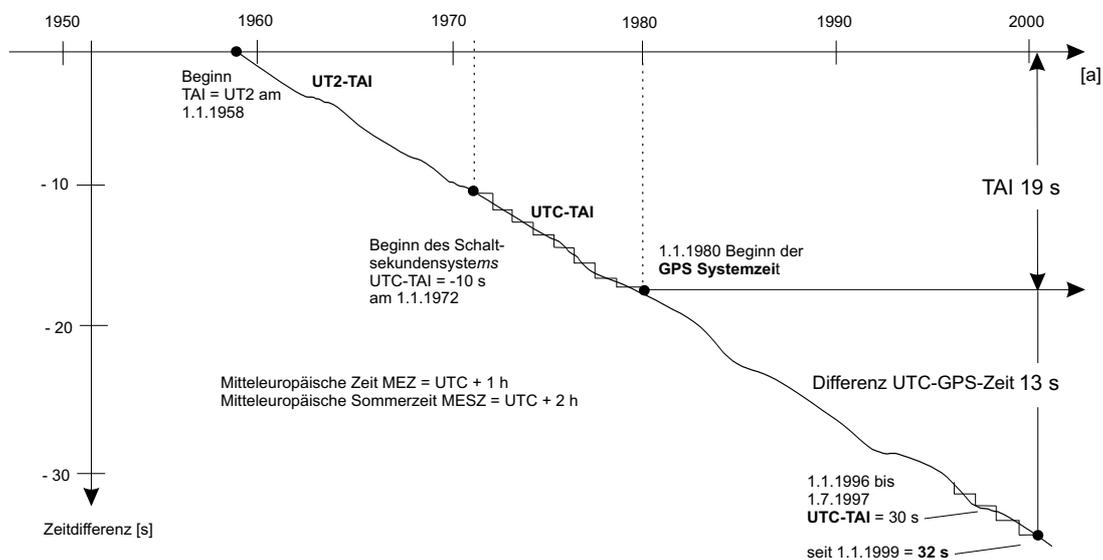


Abbildung 2.1: Übersicht der wichtigsten Zeitsysteme für geodätische Beobachtungen

Die aufgeführten Zeitskalen werden alle in Sekunden [s], Minuten [min], Stunden [h], Tag [d], Monat [m] und Jahr [a] unterteilt. Zur optimalen Summen- und Differenzbildung eignet sich jedoch die bereits im Jahre 1582 vom italienischen Astronom Scaliger eingeführte Julianische Zählweise. Der Beginn des *Julianischen Datums* (*JD*) ist auf den Mittag des 1. Januar 4713 v. Chr. festgelegt worden. Diese fortlaufende Zählweise wird z. B. bei der kontinuierlichen Ephemeridenberechnung (Liste von Positionsangaben der Satelliten als Funktion der Zeit) verwendet. Wegen der vielen Stellen von *JD* wurde im letzten Jahrhundert von der IAU ein *modifiziertes JD* (*MJD*) eingeführt. Somit ergibt sich z. B. für das Datum 24.1.03 / 11:20:07,083 Uhr ein *JD* mit 2452663,972 und *MJD* 52663,472 (- 2400000,5). Mit Beginn des Satellitenzeitalters wurden weitere alternative Tageszählweisen

wie $JD50$ oder $MJD2000$ ($MJD50 = JD - 2433282,5$; $JD2000 = JD - 2451545$) eingeführt. In der Abbildung (2.2) [LEWANDOWSKI et al., 1997] wird mit dieser Zeitdarstellungsform der relative Vergleich der GPS-Zeit, UTC_{SU} und GLONASS-Zeit zu UTC_{USNO} aus der Zeitüberwachungsstation des „US-Naval Observatory USA, Washington, DC“ (mit 30 kommerziellen Cs-Uhren, hat weltweit eine der geringsten Gangschwankungen hoch präziser Zeitsysteme) zwischen den Jahren 1992 bis 1997 dargestellt.

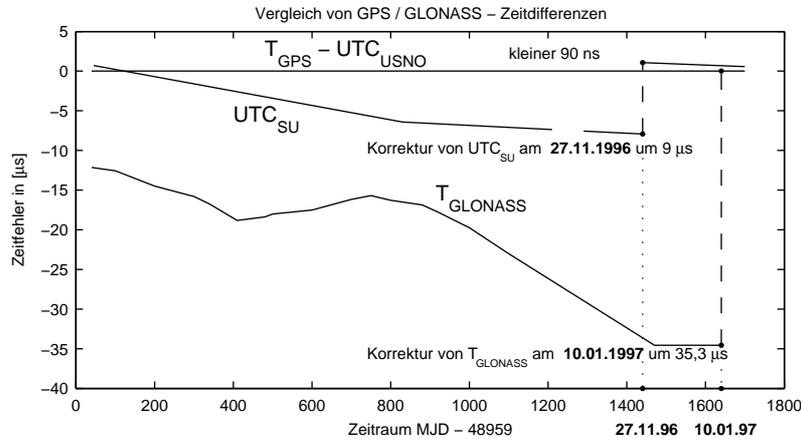


Abbildung 2.2: Zeitunterschiede $T_{GPS} - UTC_{SU}$ und $T_{GLONASS}$ nach [LEWANDOWSKI et al., 1997]

Die Berechnung der Zeitdifferenz $\Delta T_{GPS, GLONASS}$ ergibt sich nach

$$\Delta T_{GPS, GLONASS} = T_{GPS} - T_{UTC(SU)} + 3 \text{ [h]} - \tau_u - \tau_{ls} \quad (2.2)$$

mit

- 3 h konstanter Offset von 3 Stunden zwischen UTC_{SU} und UTC_{USNO} ,
- T_{GPS} GPS-Systemzeit, (genaue Beschreibung unter Absatz 2.2),
- τ_u Empfängeruhrzeitfehler und
- τ_{ls} Schaltsekunden zwischen UTC_{SU} und der GPS-Systemzeit.

Die Berechnung von UTC_{SU} erfolgen nach [ICD-GLONASS, 1995]

$$T_{UTC(SU)} = T_{GLONASS}^S + \tau_c + \tau_n(T_b) - \gamma_n \cdot (T_{GLONASS}^S - T_b) \quad (2.3)$$

mit

- $t_{GLONASS}^S$ Zeitpunkt der Signalausendung der GLONASS Satellitenskala,
- τ_c Zeitkorrektur von GLONASS-Zeit nach $UTC(SU)$ zu Beginn des aktuellen Tages,
- T_b Referenzzeit in UTC_{SU} für die Ephemeriden,
- $\tau_n(T_b)$ Korrektur der Satellitenzeit relativ zur GLONASS-Zeit und
- γ_n relative Abweichung der Trägerfrequenz des GLONASS Satelliten n .

2.2 Darstellung und Verbreitung der Zeitsysteme

Die Zeit ist die einzige der sieben Basiseinheiten (Sekunde, Kilogramm, Meter, Kelvin, Mol, Candela, und Ampere), die in Deutschland immer und überall verfügbar ist. Nach dem Zeitgesetz vom 25.07.1978 (Bundesgesetzesblatt 1978, Blatt I, S. 1110-1111) ist die PTB mit der Darstellung und Verbreitung der gesetzlichen Zeit beauftragt. Zum einen bietet die PTB die Möglichkeit der Zeitübertragung über die beiden Serverdienste des PTB-Rechenzentrums durch die Adressen (<http://ptbtime1.ptb.de> und <http://ptbtime2.ptb.de>) an. Diese Server verwenden zur Weitergabe das „Network Time Protocol, (NTP)“. Mit Zeitverzögerungen aus der Übertragung

von bis zu 25 ms muss dabei gerechnet werden. Außerdem ist die Verfügbarkeit eines solchen Internet-basierten Dienstes für geodätische Echtzeitaufgaben oft nur eingeschränkt zu realisieren.

Außerdem betreibt die PTB in Zusammenarbeit mit der Deutschen Telekom AG die Verbreitung der Zeitsignal- und Normalfrequenzaussendung durch den Langwellensender DCF77 (Deutscher Langwellensender Frankfurt, Trägerfrequenz 77,5 kHz) in Mainflingen bei Frankfurt. Mit einer Sendeleistung von 50 kW und einer abgestrahlten Leistung von etwa 30 kW wird das von den primären Atomuhren abgeleitete BCD-Signal (Binary Coded Decimal) über eine Reichweite von etwa 2000 km ausgesendet. Die PTB gibt die ausgesendete Genauigkeit des Zeitsignals besser 1 ms an [HETZEL, 1993]. Das gesendete Signal wird ständig mit den primären Atomuhren verglichen und korrigiert. Seit dem Beginn der Aussendung im Jahre 1970 ist gemäß der PTB keine Falschaussendung des Signals aufgetreten. Der Vorteil einer Langwellenübertragung ist die Verfügbarkeit des Signals in Gebäuden oder an stark abgeschatteten Gebieten (Empfang durch eine einfache Ferritantenne). Die Aussendung des DCF77-Signals ist einerseits durch die Interferenz von Bodenwellen und der hauptsächlich durch die Topografie verursachten Raumwellen in einer Höhe von ca. 70-100 km erheblich eingeschränkt. Hierbei können die Flanken des digitalen Signals nicht mehr eindeutig aufgelöst werden (vgl. Abb. 2.3). Andererseits verursachen der Sonnenstand sowie auftretende Funkstörungen entlang des Signalwegs Ungenauigkeiten. Qualitativ hochwertige und dadurch auch sehr teure DCF77-Empfänger können durch Kreuzkorrelationsverfahren die verrauschten Flanken des Signals relativ gut eliminieren und erreichen dadurch eine Genauigkeit unterhalb einer Millisekunde (vgl. z. B. <http://www.hopf.com> oder <http://www.meinberg.de>). Außerdem führt die Laufzeitverzögerung des Signals durch die atmosphärische Refraktion zu weiteren Störungen. Diese Einflussgrößen verursachen zusammen mit der Qualität des DCF77-Empfängers ein Rauschen, das in einer Entfernung von ca. 350 km zum Sender (Untersuchung: Sender mit dem Standort Mainflingen zum Empfänger in Freising) über 50 Millisekunden betragen kann (vgl. Abb. 2.4 links). Außerdem erzeugen große Temperaturschwankungen oder Gewitter (siehe Abb. 2.4 rechts) ein Rauschen von mehreren 100 ms.

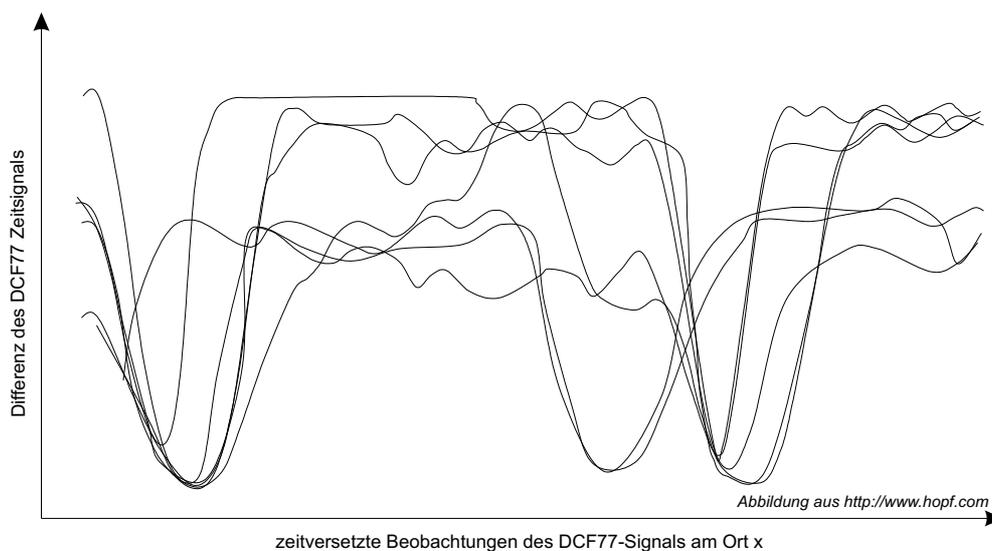


Abbildung 2.3: Übersicht der Interferenzbildung von Boden- und Raumwellen an den Flanken des Langwellensignals

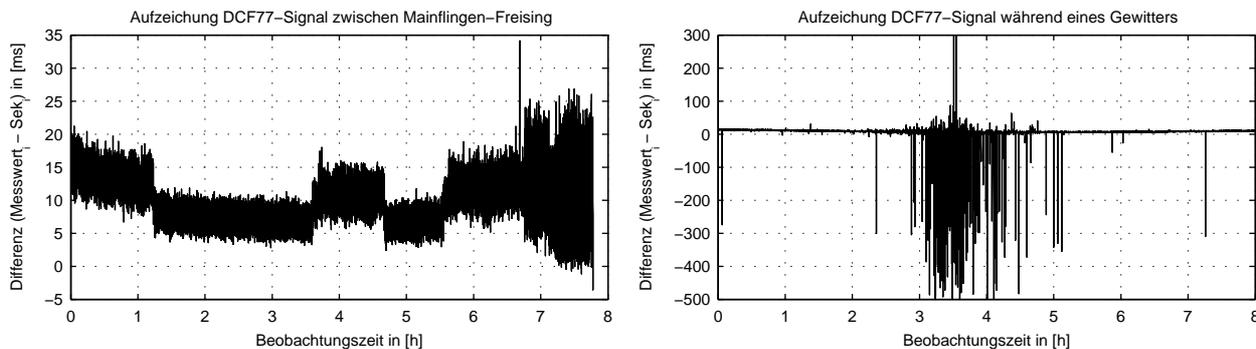


Abbildung 2.4: Signalrauschen in einer Entfernung von 350 km / Einfluss eines Gewitters während der Beobachtung

Somit ist die Verwendung des kostenlosen DCF77-Services mit einfachen und günstigen DCF77-Empfängern zur Schaffung einer einheitlichen Zeitbasis mit einer Unsicherheit von ± 1 Millisekunde nicht geeignet.

Neben der Verbreitung der *UTC*-Zeit mit den DCF77-Services und der NTP-Übertragung erfolgen an der PTB Phasenvergleiche zwischen der *UTC*-Zeitskala und den Ankunftszeiten der in Braunschweig empfangenen Signale des Navigationssenders LORAN-C/Sylt und der GPS-Systemzeit. Die Ergebnisse werden ebenfalls in einem Service-Bulletin der PTB im Wochenzyklus veröffentlicht und dienen gleichzeitig dem Nachweis der Rückführbarkeit auf das nationale Zeitnormal. Die Synchronisationsimpulse werden von Rubidium-Atomfrequenznormalen abgeleitet, deren DCF77-Normalenvergleich mit einer Unsicherheit von kleiner $1 \cdot 10^{-11}$ an die PTB-Normalfrequenz angeschlossen ist.

Gegenwärtig werden für internationale Präzisionsvergleiche der Atomuhren an verschiedenen Orten so genannte „Common-View“-Zeitvergleiche mit GPS angewendet. Durch die wechselseitige Synchronisation zweier unabhängiger GPS-Empfänger A und B können aus den simultanen Messreihen über die Differenzbildung

$$\Delta T_B^A = \Delta T_{UTC}^A - \Delta T_{UTC}^B = \Delta T_{GPS}^A - \Delta T_{GPS}^B = T_A - T_B \quad (2.4)$$

einige systematische Fehler eliminiert werden. Als redundantes Verfahren zur Stützung der koordinierten Weltzeit wird neben der GPS-Systemzeit ein hoch präzises Zeitübertragungsverfahren via dem Telekommunikationssatelliten INTELSAT 307° Ost mit neun weiteren Zeitinstituten weltweit in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Die Unsicherheit dieses Zweiweg-Zeitvergleichs wird mit etwa einer Nanosekunde angegeben. Das Verfahren kann unter (http://www.ptb.de/de/org/4/43/433/_index.htm) genauer nachgelesen werden.

In den letzten Jahren werden immer häufiger GPS-gestützte Zeitübertragungssysteme verwendet. In den Anfängen unterschied man nach [ALLAN u. WEISS, 1980] in „Time Dissemination - Genauigkeit ± 100 ns, Clock Fly-Over - Genauigkeit ± 450 ns, Common-View - Genauigkeit ± 10 ns und Interferometry Mode - Genauigkeit ± 1 ns“. Heute wird ausschließlich das Verfahren des simultanen Anmessens aller sichtbaren Satelliten angewendet. Im Jahr 1997 wurde das IGS/BIPM Projekt zur Zeitübertragung mit einer Genauigkeit von $\sim 0,01$ ns im post-processing gestartet. Eine genauere Erläuterung dieser präzisen *UTC*-Zeitübertragung kann unter (http://igscb.jpl.nasa.gov/projects/tim_trans.html) nachgelesen werden.

Die Satelliten des NAVSTAR GPS-Systems sind mit Cäsium- und Rubidiumuhren ausgestattet, wobei den Cäsiumuhren hier eine höhere Genauigkeit zugeordnet werden kann. Das vom „U.S. Space Command Center“ ausgegebenen „Notice Advisory to NAVSTAR Users“ (NANU in http://gibs.leipzig.ifag.de/cgi-bin/gps_status.cgi?en, Stand 07.10.03) beinhaltet für das angegebene Beispiel

```

SUBJ: GPS-STATUS          05 Dec 2003
1. SATELLITES, PLANES, AND CLOCKS (CS=CESIUM RB=RUBIDIUM):
A.  BLOCK I : NONE
B.  BLOCK II: PRNS   1,   2,   3,   4,   5,   6,   7,   8,   9,  10,  11,  13,  14,  15
    PLANE  :  SLOT F4,  B5,  C2,  D4,  B4,  C1,  C4,  A3,  A1,  E3,  D2,  F3,  F1,  D5
    CLOCK  :         CS,  CS,  CS,  RB,  CS,  CS,  RB,  RB,  CS,  CS,  RB,  RB,  CS
    BLOCK II: PRNS  16,  17,  18,  20,  21,  23,  24,  25,  26,  27,  28,  29,  30,  31
    PLANE  :  SLOT B1,  D6,  E4,  E1,  D3,  E5,  D1,  A2,  F2,  A4,  B3,  F5,  B2,  C3
    CLOCK  :         RB,  CS,  RB,  RB,  RB,  CS,  CS,  CS,  RB,  RB,  RB,  RB,  RB,  RB

```

Abbildung 2.5: NAVSTAR GPS-Satellitenstatus vom 05.12.03

12 Cäsiumuhren und ebenfalls 16 Rubidiumuhren. Das Gangverhalten dieser Atomuhren wird durch das Kontrollsegment sorgfältig überwacht und geregelt. Geodätische GPS-Empfänger mit der Möglichkeit der Rohdatenspeicherung können alle Informationen in einem international standardisierten ASCII-Format RINEX (Receiver INdependent EXchange format, [GURTNER, 1994], Aufteilung in ein Observation- und Navigationfile) ausgeben. Aus dem Navigationfile des OBJ: RECORD (PRN / EPOCH / SV CLK) können die Informationen SV clock bias in (sec.), SV clock drift in (sec./sec.) und SV clock drift rate in (sec./sec².) jedes Satelliten entnommen

werden. In Zukunft soll das Raumsegment mit den neuen Satelliten des Typs Block IIF selbst Messungen, Berechnungen und Aufdatierungen durchführen, so dass die Satellitenuhren auch nach 60-tägiger Unterbrechung der uploads im unveränderten GPS-Zeitsystem verbleiben [EISSFELLER, 2002].

Durch die Nutzung des **PPS-Event (Pulse Per Second)** spezieller GPS-Empfänger besteht die Möglichkeit, den hoch präzisen *UTC*-Zeitimpuls der GPS-Systemzeit zu verwenden. Das Nutzersegment sendet, ausgehend von dem empfangenen Signal der Satelliten und dessen Laufzeitberücksichtigung, einen digitalen Impuls aus. Bei dem Leica SR530 Receiver ist dies ein positives und negatives Signal mit einer Spitze von 3,3 V bei 50 Ω Widerstand. Die positive Signallänge beträgt 25 ms, wobei die führende Flanke den Beginn der Epoche angibt.

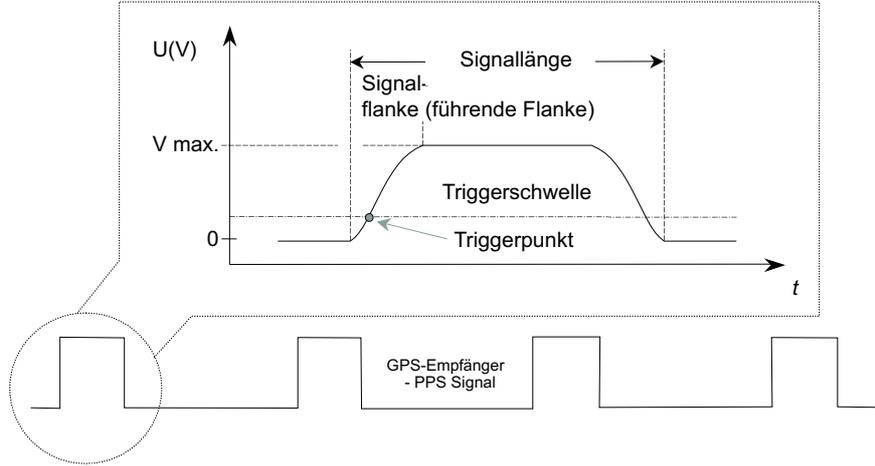


Abbildung 2.6: PPS-Event eines GPS-Empfängers

Die für die Zeitübertragung fundamentale Synchronisationsgleichung nach [LEWANDOWSKI u. THOMAS, 1991] liefert den Uhrenstand ΔT_{UTC}^A zwischen einem GPS-Empfänger und UTC_k

$$\Delta T_{UTC}^A = PR_{E,gem}^S - (PR_{E,ber}^S + \Delta\tau_{Ion} + \Delta\tau_{Trop} + \Delta\tau_{Sag}) - \Delta\tau_{Rx} + \Delta T_{GPS}^S + \Delta T_{GPS,UTC} \quad (2.5)$$

mit

$PR_{E,gem}^S$	im Empfänger registrierte und berechnete Signallaufzeit zwischen Satellit S und dem GPS-Empfänger E ,
$\Delta\tau_{Ion}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der ionosphärischen Signalrefraktion,
$\Delta\tau_{Trop}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der troposphärischen Signalrefraktion,
$\Delta\tau_{Sag}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der Erddrehung (Sagnac-Effekt),
$\Delta\tau_{Rx}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der Signalverzögerung im Empfänger E ,
$\Delta T_{GPS,UTC}$	Ablage zwischen der GPS-Systemzeit / UTC_{USNO} , im IGS-System ist hier die relativistische Uhrenkorrektur in den Satelliten nicht berücksichtigt

und

$$\Delta T_{GPS}^S = a_0 + a_1 \cdot (T_{GPS} - T_0) + a_2 \cdot (T_{GPS} - T_0)^2 \quad (2.6)$$

mit

ΔT_{GPS}^S	Ablage zwischen der Zeit des Satelliten S und der GPS-Systemzeit,
a_0, a_1, a_2	Koeffizienten für Stand, Gang und Alterung der Satellitenzeitskala (aus [ZEBHAUSER, 2000]),
T_{GPS}	aktuelle GPS-Systemzeit und
T_0	Referenzzeitpunkt (aktuelle GPS-Epoche).

Durch Verwendung der vereinfachten Beobachtungsgleichung der Pseudorange-Messung (ohne Berücksichtigung der ionosphärischen und troposphärischen Refraktion, Mehrwegeeffekten, Orbitfehlern, zufälligen Messfehlern, Antennenvariationen und dem Signalrauschen) für das stand-alone-Verfahren

$$PR_{E,ber}^S = (tt - T_0^S) \cdot c = R_E^S - (\Delta T^S + h_S) \cdot c - (\Delta T_E + h_E) \cdot c \quad (2.7)$$

mit

$PR_{E,ber}^S$	Pseudorange-Beobachtung (rechnerisch korrigiert zwischen Satellit S und dem GPS-Empfänger E),
tt	Empfängerzeitpunkt (time tag),
T_0^S	Sendezeitpunkt im Satelliten,
R_E^S	geometrische Entfernung zwischen Empfänger und Satellit,
ΔT^S	Fehler der Satellitenuhr,
h_S	Instrumentelle Signalverzögerung im Satellit,
ΔT_E	Fehler der Empfängeruhr,
h_E	Instrumentelle Signalverzögerung im Empfänger und
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,

kann die Signallaufzeit $PR_{E,ber}^S$ im GPS-Empfänger berechnet werden. Die Näherungskordinate des Empfängers $P_E^N(X_E^N, Y_E^N, Z_E^N)$ muss mit einer Genauigkeit von einigen Kilometern vorgegeben werden. P_E^N kann aus dem RINEX-Header entnommen werden. Der Ortsvektor des Satellitenorbits $P^S(X^S, Y^S, Z^S)$ errechnet sich aus den Ephemeridendaten und den Pseudoranges. Die Distanz zwischen dem jeweiligen Satelliten und dem Näherungswert des Empfänger-Ortsvektors ergibt sich über

$$S_E^N = \sqrt{(X^S - X_E^N)^2 + (Y^S - Y_E^N)^2 + (Z^S - Z_E^N)^2}. \quad (2.8)$$

Die mit der Methode der Single-Point-Position (SPP) gesuchte Empfängerposition $P_E(X_E, Y_E, Z_E)$ ergibt sich durch

$$R_E^S = \sqrt{(X^S - X_E)^2 + (Y^S - Y_E)^2 + (Z^S - Z_E)^2}. \quad (2.9)$$

Gegebenenfalls sind noch Antennenexzentrizitäten (Antennenphasenzentrumsvariation und Antennenhöhe über dem Punkt) in den geometrischen Berechnungen zu berücksichtigen. Dadurch ergibt sich die linearisierte Beobachtungsgleichung

$$PR_{E,ber}^S = S_E^S - \frac{X^S - X_E^N}{S_E^S} \cdot \Delta X_E - \frac{Y^S - Y_E^N}{S_E^S} \cdot \Delta Y_E - \frac{Z^S - Z_E^N}{S_E^S} \cdot \Delta Z_E - \Delta T^S \cdot c - \Delta T_E \cdot c \quad (2.10)$$

mit den Unbekannten $\Delta X_E, \Delta Y_E, \Delta Z_E$ Koordinatenzuschlägen zur Näherungsposition des GPS-Empfängers und $\Delta T_E^S (\Delta T^S, \Delta T_E)$ als Uhrensynchronisationsfehler der Satelliten- und vor allem der Empfängeruhr zur GPS-Systemzeit

$$\Delta \hat{x} = [\Delta X_E \quad \Delta Y_E \quad \Delta Z_E \quad \Delta T_E^S]^T. \quad (2.11)$$

Da ΔT^S durch Berücksichtigung des Satellitenuhr-Offset zur Referenzepoche, der Satellitenuhr-Drift und des Satellitenuhr-Ageing durch die Ephemeriden (ständig durch die uploads der Kontrollstationen korrigiert) bekannt sind und in der Berechnung berücksichtigt werden, ist dieser Uhrenfehler im Verhältnis zur nicht direkt

messbaren Größe ΔT_E sehr klein. Somit gilt $\Delta T_E \gg \Delta T^S$ (vgl. Abb. 2.7). Bekanntlich werden zur Lösung dieser Gleichung mit vier Unbekannten mindestens vier Satelliten zeitgleich benötigt. Bei $n > 4$ fallen redundante Beobachtungsgleichungen an.

Der Zusammenhang zwischen den Beobachtungsgleichungen und den einzelnen DOP-Werten (Dilution of Precision) wird z. B. in [WUNDERLICH, 1993] ausführlich erläutert. Mit dieser Methode aus der Ausgleichsrechnung können alle Beobachtungsepochen eines Empfängers zu den n -Satelliten verarbeitet werden. Die in der folgenden Abbildung (2.7) dargestellte Berechnung im post-processing von ΔT_E aus den RINEX-Daten eines Leica SR530 ergab folgende Variation im Verhältnis zur Positionsgenauigkeit und somit auch zum Rauschen der Pseudorange.

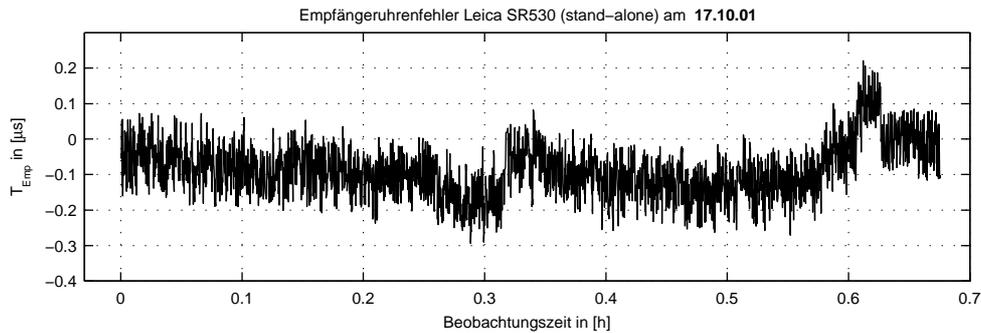


Abbildung 2.7: Variation der Empfängeruhr

Hierbei bewirkt die Leistungsfähigkeit der Hard- und Softwarekomponenten des Empfängers einen deutlichen Fehleranteil. Der Bereich erstreckt sich im μs -Bereich. In der Erläuterung differentieller GPS-Verfahren wird mit der Formel (3.9) aufgezeigt, dass die Unbekannte ΔT_E bei Pseudorange-korrigierten und RTK-Verfahren noch genauer bestimmt wird. Analog dazu ergab der nachfolgende Plot (2.8) eines Satellitenuhrenfehlers zur UTC-Zeitskala folgendes Verhalten:

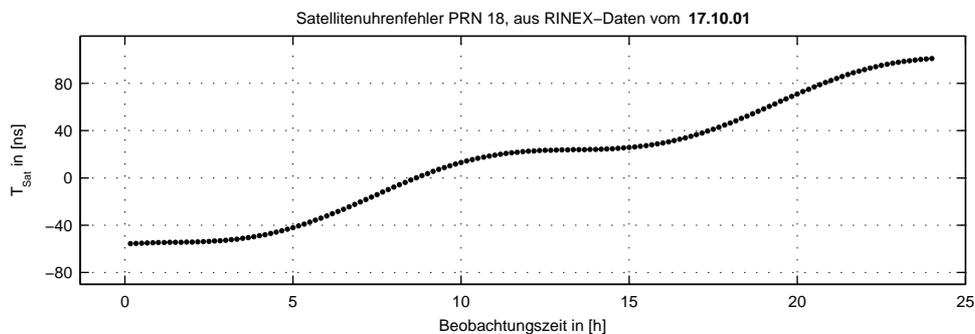


Abbildung 2.8: Fehler in der Satellitenuhr $\Delta T^{S,18}$

Der relativistische Anteil der Bahnexzentrizität ist hier durch das sinusförmige Verhalten eindeutig erkennbar [ZEBHAUSER, 2000]. Die Genauigkeit einer Tagesbeobachtung aus allen Satelliten beträgt wenige $1 \cdot 10^{-8}$ s. Diese Darstellung belegt, dass die Nutzung des PPS-Events als gemeinsame Zeitbasis mit der Forderung der Zeitunsicherheit kleiner 1 ms verwendbar ist. Der ausgegebene Impuls gibt im Gegensatz zum DCF77-Signal den Beginn einer Sekunde im UTC-Zeitsystem exakt an.

Zur Verwendung dieser digitalen Marke als gemeinsamer Zeitrahmen für geodätische Beobachtungen bewegter Objekte muss des Weiteren ein Registrierungssystem erstellt werden. Durch die geforderte Genauigkeit der gemeinsamen Zeitbasis ist es ausreichend, wenn das PPS-Event aus den nicht differentiellen Code-Messungen berechnet wird. Pseudorange-korrigierte Code-Messungen oder Trägerphasen-, d. h. RTK-Messungen sind nicht erforderlich.

Satellitengestützte Zeitübertragungssysteme

Ende der fünfziger Jahre wurden die ersten Satellitensysteme entwickelt. Gleichzeitig erkannte man, dass die implementierten hoch präzisen Satellitenuhren für Aufgaben der genauen Zeitübertragung verwendet werden können. Eine Zusammenstellung der verfügbaren Systeme Mitte der achtziger Jahren wird z. B. in der Veröffentlichung [SCHLÜTER, 1988] und [BEDRICH, 1998] dargestellt:

System	Zeitraum	Übertragungsmethode	Genauigkeit der Zeitübertragung	Bemerkung	Literatur
NNSS (Transit)	seit Mitte der sechziger Jahre	2 Freq.	einige μ s	System 1996 eingestellt	[SEEBER, 1993]
MITREX	seit 1983	2 Freq.	1-2 ns	-	[KIRCHNER, 1991]
GLONASS	Aufbau 1982 operational 1996	2 Freq.	Common-View: 20 ns	-	[LEWANDOWSKI et. al., 1996]
PRARE	Aufbau 1985 operational 1994	2 Freq.	50 ns	-	[BEDRICH, 1998]
LASSO	Vorschlag 1972 operational 1988	1 Freq.	1 ns	opt. System	[LESCHIUTTA 1991]
STIFT	Experiment von 1981	3 Freq.	1 ns	-	[ALLAN et. al., 1981]
NAVEX	Experiment von 1985	2 Freq.	10 ns	-	[STARKER et. al., 1990]
RTKGPS	ab 1998	2 Freq.	0,01 ns	-	[MATAKIS, 1999]

Tabelle 2.2: Vergleich der wichtigsten Zeitübertragungssysteme

- NNSS - Satelliten des US-amerikanischen Navy Navigation Satellite System - kurz „Transit“ bezeichnet,
- MITREX - Microwave Timing and Ranging EXperiment / entwickelt von Institut für Navigation an der Universität Stuttgart,
- GLONASS - GLObal NAVigation Satellite System / russisches Pendant zu NAVSTAR GPS,
- PRARE - Precise Range And Range-Rate Equipment / von der Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten (DASA) und ESA (European Space Agency) konzipiert und operational in Anwendung gebracht,
- LASSO - LASer Synchronization from geoStationary Orbit / französische Instrumentenbaugruppe,
- STIFT - Shuttle TIME and Frequency Transfer / NASA (National Aeronautics and Space Administration) und
- NAVEX - NAVigation-EXperiment / Spacelab-Mission D1.

Eine Beschreibung der einzelnen Funktionsweisen dieser aufwändigen und kostenintensiven Zeitübertragungssysteme wird z. B. in [BEDRICH, 1998] ausführlicher dargestellt.

2.3 System zur GPS-Zeiterfassung für kinematische Messaufgaben

Eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit einer Messdaten- und Zeiterfassung kinematischer Beobachtungen bietet ein robustes feldtaugliches Notebook mit mehreren Schnittstellen. Alle Informationen der Messsensoren und des PPS-Events werden hierbei über das serielle asynchrone Protokoll RS232 (Data Carrier Equipment, DCE) zur Erfassungseinheit (Data Terminal Equipment, DTE) übertragen. Die entsprechenden Parameter der Stoppbits, der Parität, der Übertragungsrate sowie der Pin-Belegungen müssen sowohl am Messsensor als auch an der Erfassungsssoftware identisch sein. Bei dieser Übertragungstechnik werden die einzelnen Datenbits eines ASCII-Zeichens nacheinander als Spannungszustand über die Sende- bzw. Empfangsleitung übertragen. Eine logische „1“ entspricht dabei einem negativen Spannungspegel, eine logische „0“ dagegen einem positiven

Spannungspegel von wenigen Volt. Durch entsprechende Adapter oder Karten können die PCMCIA oder USB-Slots als zusätzliches RS232-Interface genutzt werden. Die folgende Abbildung stellt das **Erfassungssystem** mit fünf Schnittstellen im Bezug zu den gesendeten geodätischen Messdaten und dem PPS-Signal (Setzen einer PC-Zeitmarke beim Eintreffen des PPS-Events an der Schnittstelle) dar.

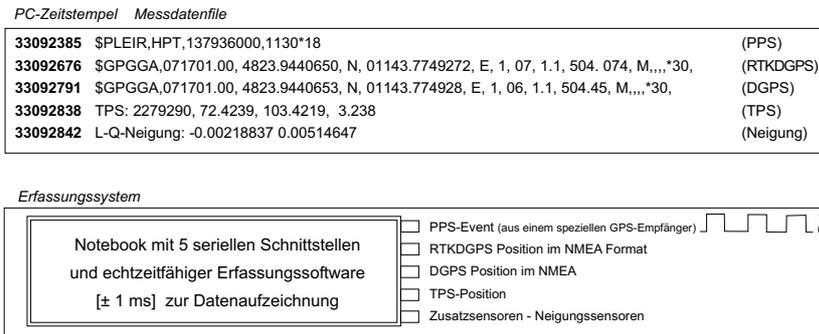


Abbildung 2.9: Log-File einer geodätischen Echtzeitbeobachtung / Datenerfassungssystem

Neben dem „Port-Handle“ des Betriebssystems ist die Erfassungssoftware für die Datenregistrierung, für das Setzen des Zeitstempels und für die Datenspeicherung verantwortlich. Ein entwickeltes multithreading-fähiges C-Programm führt diese Aufgabe durch. Es kombiniert die *UTC*-Zeit (festgelegt durch das PPS-Event) mit der Rechnerzeit der CPU. D. h. beim Eintreffen des PPS-Impulses setzt das Programm zeitgleich einen PC-Zeitstempel mit Millisekundengenauigkeit. Im Messdatenfile wird anschließend jeder erste String einer Datenzeile mit einer PC-Zeitmarke abgespeichert (vgl. obere Abb. 2.9). Aus

$$t_{Begin}^{Data} = T_{UTC} + \Delta t^{PC} (t_{PPS}^{PC}, t_{String}^{PC}) \quad (2.12)$$

mit

- T_{UTC} Zeit in *UTC* Sekunde,
 Δt^{PC} Differenz der PC Zeit aus,
 - t_{PPS}^{PC} PC-Zeitstempel des PPS-Impuls und
 - t_{String}^{PC} PC-Zeitstempel der Datenzeile (erste String)

ergibt sich die Möglichkeit der exakten *UTC*-Zeitzuordnung aller ankommenden Datenzeilen der RS232-Schnittstelle. Aus der Stringlänge und der Übertragungsrate kann über

$$t_{End}^{Data} = t_{Begin}^{Data} + \frac{n \cdot Bits \cdot m \cdot Characters}{Baudrate} \quad (2.13)$$

das Ende einer kompletten Datenzeile in *UTC* eingegrenzt werden. Dabei bezeichnet n die Anzahl der Bits und m die Anzahl der Characters des Datenstrings. Mit den beiden Betriebssystemen Windows NT4.0 und 2000 kann gleichzeitig die Prioritätsfestlegung des Erfassungsprozesses definiert werden. Dies kann einerseits durch den Task-Manager/Prozesse manuell auf *Niedrig*, *Normal*, *Hoch* bzw. *Echtzeit* oder durch die Funktion

- `SetPriorityClass(GetCurrentProcess(), REALTIME_PRIORITY_CLASS);` -

direkt in der C/C++ Erfassungssoftware auf *Echtzeit* gesetzt werden. Somit wird vom Betriebssystem annähernd die gesamte CPU-Rechnerkapazität (99,9 %) für diese Aufgabe verwendet. Bei den Betriebssystemen Windows 95, 98 und ME existiert keine Möglichkeit der CPU-Kapazitätszuweisung. Deshalb ist deren Verwendung für solche Anwendungen auch eher ungeeignet. Der Ressourcenverbrauch dieser Betriebssysteme ist jedoch viel geringer als bei Windows NT oder 2000 (vgl. Tab. 2.3). Außerdem wirkt sich die Prozessorart und -leistung (Taktfrequenz) auf die Leistungsfähigkeit des Erfassungssystems aus. Untersuchungen, bei denen die Abfrage des Ports durch die Erfassungssoftware pro Sekunde verschiedener Prozessoren mit unterschiedlichen Betriebssystemen verifiziert wurde, zeigen dies eindeutig.

Prozessor	Betriebssystem	Drift der PC-Uhr	Portabfrage pro [s]	PPS-Rauschen
PII 133 MHz	Win NT4.0	$y = +0.081 \cdot x + 0.366$	5776	± 1 ms
PII 133 MHz	Win 95	$y = +0.233 \cdot x + 0.027$	29051	± 2 ms
PII 166 MHz	Win 95	$y = +0.142 \cdot x + 0.145$	72852	± 5 ms
PII 350 MHz	Win 2000	$y = +0.018 \cdot x + 0.286$	19975	± 1 ms
PII 300 MHz	Win 98	nicht auswertbar	51150	–
PII 300 MHz	Win 2000	$y = +0.018 \cdot x + 0.801$	16988	± 2 ms
K6 350 MHz	Win 98	$y = -0.066 \cdot x + 0.092$	61173	± 2 ms
K6 350 MHz	Win 2000	$y = -0.086 \cdot x + 0.162$	19642	± 1 ms

Tabelle 2.3: Rechnerleistung und Drift des PC-Quarzes ($y = m \cdot x + t$, $y = \Delta t$ und $x =$ Beobachtungszeit)

Die Verteilung einer Messung wird in der nachfolgenden Abbildung am Beispiel eines K6-350 MHz Rechners sowohl mit dem Betriebssystem Windows 98 als auch mit Windows 2000 gezeigt. Untersuchungen mit Windows XP oder Linux wurden nicht durchgeführt.

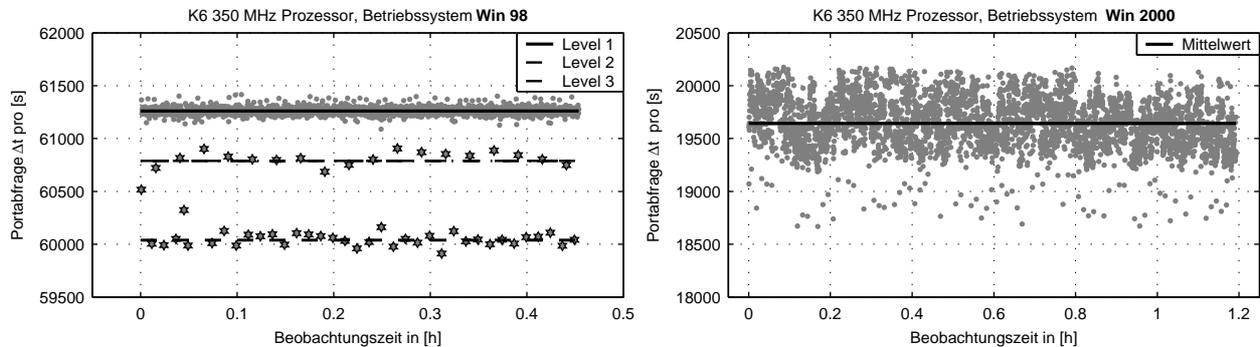


Abbildung 2.10: Schnittstellenabfrage mit dem Betriebssystem Windows 98 und Windows 2000, K6 - 350 MHz

Diese Übersicht verdeutlicht, dass allein durch die Verwendung unterschiedlicher Betriebssysteme ein etwa dreifacher Leistungsunterschied bei der Schnittstellenabfrage verursacht wird. Jedoch wird selbst mit einer Leistung von 133 MHz unter Windows NT die RS232 Schnittstellenabfrage ca. alle 0,17 ms in der Schleife durchlaufen. Bei allen untersuchten Prozessoren traten unterschiedliche Driften der PC-Uhr, unter anderem abhängig vom Betriebssystem auf. Durch eine Regressionsgerade kann dieser Alterungskoeffizient des PC-Quarzes als Drift 1. Ordnung reduziert werden. Bei Messungen über mehrere Stunden hinweg zeigen sich auch Effekte 2. Ordnung (näherungsweise Funktionen 2. oder 3. Grades). Die Steigung (3. Spalte Tab. 2.3) der Regressionsgeraden ist jedoch so gering, dass dieser Einfluss zwischen zwei aufeinander folgenden PPS-Impulsen (meist eine Sekunde) vernachlässigbar ist. Beobachtungen über mehrere Stunden belegen dies zusätzlich. Das Betriebssystem verursacht außerdem durch interne update-Funktionen gelegentlich einige Ausreißer im Bereich von mehreren Millisekunden (vgl. Niveau 2 und 3 Abb. 2.10, links).

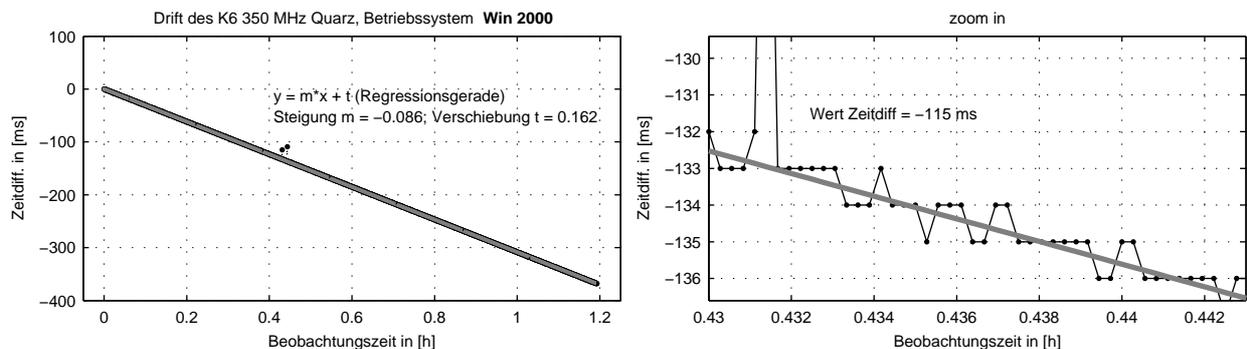


Abbildung 2.11: Drift der PC Uhr

Zur Überprüfung des Erfassungssystems auf der Basis des PPS-Events wurde ein separater Impulsgeber (ESX-Steereinheit mit einem Siemens 127 Chip, 20 MHz Prozessor) mit hoher Stabilität der Sensortechnik Wiedemann GmbH (Kaufbeuren) verwendet. Diese hauptsächlich zur Steuerung und Regelung von Baumaschinen eingesetzte Einheit wurde mit dem PPS-Implus verglichen. Sowohl der relative Vergleich der fünf Schnittstellen aus dem Erfassungssystem (Abb. 2.9) zueinander (linke Abb. 2.12) als auch der direkte Vergleich mit der ESX-Box (rechte Abb. 2.12) ergaben maximale Abweichungen von ± 1 ms. Somit können mit dem dargestellten Registrierungssystem kinematische Beobachtungen mit präzisen Zeitmarken verknüpft und die Echtzeitfähigkeit der Sensoren genauer analysiert werden.

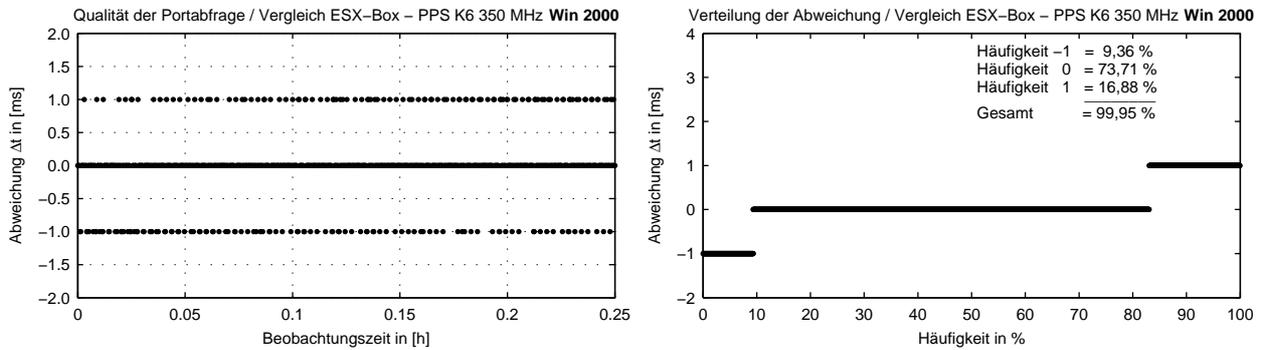


Abbildung 2.12: Genauigkeitsuntersuchung des Erfassungssystems mit PPS-Event Trigger

Zusätzlich wurden mit diesem Verfahren unterschiedlich berechnete PPS-Events (z. B. Leica SR530 mit dem GPS-Empfänger GPSGEN1575 der Fa. Meinberg, Bad Pyrmont) gegenseitig verglichen. Dieses Vorgehen stellt Abb. (2.13) skizzenhaft dar.

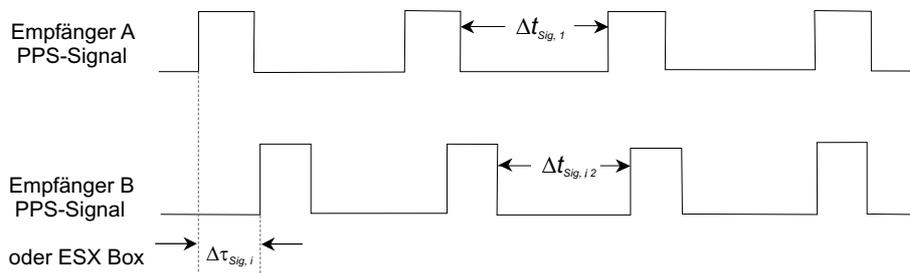


Abbildung 2.13: Zeitversatz zweier unterschiedlich berechneter PPS-Events

Es konnten jedoch ebenfalls im Genauigkeitsbereich des geodätischen Echtzeitregistrierungssystems keine Unterschiede von Δt_1 zu Δt_2 und $\Delta \tau_i$ festgestellt werden.

Die Untersuchung und Kalibrierung kinematischer Messinstrumente hinsichtlich dem Zeitverhalten bei Echtzeitanwendungen erfordert bei maximal auftretenden Bewegungen bis zu wenigen Metern pro Sekunde ein Registrierungssystem im Genauigkeitsbereich von ± 1 ms. Hierzu bietet sich das UTC-Zeitsystem als gemeinsame Basis an. Unter der Berücksichtigung der Datenübertragungsmenge und -geschwindigkeit sowie rechner- und betriebssystemabhängiger Einflussgrößen bietet dieses Datenerfassungssystem die Grundlage zur Kalibrierung als auch zur Kombination kinematischer Messsensoren. Als kostengünstiger Impulsgeber bietet sich die Verwendung des PPS-Event als Zusatzoption geeigneter GPS-Empfänger an.

3 Kinematische GPS-Beobachtungen

3.1 Technische Grundlagen kinematischer Beobachtungen

Das globale Positionierungssystem NAVSTAR GPS wird gegenwärtig neben der ursprünglichen militärischen Verwendung immer häufiger in Bereichen der Geo- und Ingenieurwissenschaften eingesetzt. Neben der verbesserten Empfängertechnologie, der Abschaltung von S/A (Selective Availability, eingeschränkte Nutzung des GPS-Signals für stand-alone Anwendungen durch künstliche Verrauschung der Satellitensignale) am 1. Mai 2000, der Verfügbarkeit verschiedener nationaler und internationaler DGPS-Korrekturdienste und einer geeigneteren Konstellation der Satelliten (vgl. Abb. 2.5) haben eine Fülle von wissenschaftlichen Arbeiten zur besseren Modellierung der Signalausbreitung, der Eliminierung von Fehlereinflüssen und so zu einer erheblichen Leistungssteigerung des GPS-Systems beigetragen. Zur eindeutigen Trennung militärischer und ziviler Nutzung ist in Zukunft eine Entkoppelung des Raumsegments geplant. Ein neues militärisches Signal L_M wird mit den Satelliten des Block IIR (SV 41-62)/IIF (SV 63-96) integriert. Dieser neue und sichere militärische Code (M-Code) erhöht die Störfestigkeit militärischer GPS-Empfänger. Neue zivil verfügbare Signale werden in den einzelnen GPS-Modernisierungsphasen (GPS IIR-M - first launch 2003, IIF Lite first launch 2005 und GPS III) realisiert. Das zusätzliche zivile Signal auf L2 (L2CS) erlaubt eine Korrektur der Ionosphäre und eine robuste Bestimmung der Mehrdeutigkeiten. Ein weiteres ziviles Signal auf der neuen Frequenz L5 mit 1176,45 MHz soll durch die neue Generation GPS III realisiert werden. Modernisierungen und Erweiterungen im Bodensegment (größere Anzahl der Bodenstationen, optimale upload Strategien, Verbesserungen der GPS-Zeit zu $UTC < 20$ ns, bessere Algorithmen, Operational Control Segment, International Services for Geodynamics, etc.) runden die Verbesserungen ab. Dadurch werden in den nächsten 15 Jahren alle GPS-Segmente (Raum-, Kontroll- und Nutzersegment) umfassend optimiert. Außerdem werden zusätzliche Signale durch das russische satellitengetragene GLONASS-System (Tabelle ebenfalls aus dem GPS-Informations- und Beobachtungssystem GIBS entnommen) und in Zukunft durch die Integration des "Europäischen Globalen Navigations Satelliten System GALILEO" (nähere Systembeschreibung unter <http://www.galileo.com/>) ausgesendet.

SUBJ: GLONASS STATUS		05 December 2003							
1. SATELLITES, PLANES, SLOTS AND CHANNELS									
Plane 1/	slot:	01	02	03	04	05	06	07	08
	Channel:	--	--	12	--	02	--	--	--
Plane 2/	slot:	09	10	11	12	13	14	15	16
	Channel:	--	--	--	--	--	--	--	--
Plane 3/	slot:	17	18	19	20	21	22	23	24
	Channel:	05	10	--	--	05	10	11	03

Tabelle 3.1: GLONASS Satellitenstatus vom 05.12.03

Die Positionsrechnung basiert auf der Laufzeitmessung des ausgesendeten Signals mit aufmoduliertem PRN (Pseudo Random Noise) zwischen den GPS-Satelliten und dem Empfänger auf der Basis der unter (2.10) dargestellten Grundgleichung. Beim Auswertungsprozess wird grundsätzlich zwischen dem post-processing (Datenprozessierung statischer Rohdaten mit komplexen Modellen zur Fehlereliminierung, Mehrdeutigkeitslösung, Minimierung der Multipatheffekte und Datenfilterung) und der Echtzeitauswertung (real-time Auswertung, Stufe 1) unterschieden. Bei Echtzeitanwendungen müssen alle Reduktionen, Pseudorange-Korrekturen oder Phasenmehrdeutigkeitslösungen, Filterungen und Fehlerminimierungen ohne zeitlicher Verzögerung erfolgen. Eine Modifizierung der Ausgabeoptionen von Echtzeitpositionen ist nur bedingt durch die Veränderung weniger Parameter wie z. B. der Wahl der Elevationsmaske oder des Positionsfilters (Land-, Wasser oder Flugbewegungen) möglich. Die auftretenden Systemfehler während der kinematischen Positionsrechnung können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Zum einen können Orbitfehler sowie ionosphärische und troposphärische Refraktionsinflüsse in Abhängigkeit der Stationsabstände betrachtet werden. Zum anderen treten stationsabhängige Fehler wie Mehrwegeausbreitung (Multipath), Phasensprünge (Cycle Slips) und Phasenexzentrizität auf. Eine entscheidende Bedeutung muss der Hard- und Software des Nutzersegments zugeordnet werden.

3.1.1 Allgemeine Systemfehler

Orbitfehler

Die Abweichungen der Orbitdaten sind keine Beobachtungsfehler. Sie werden jedoch beim Auswerteprozess eingeführt und wirken sich so auf die Positionsberechnung aus. Die vom Satellit gesendeten *broadcast*-Ephemeriden (berechnet aus den fünf GPS-Kontrollstationen) stehen als Teil der Navigationsnachricht bei der Auswertung zur Verfügung (Verfügbarkeit der *broadcast*-Ephemeriden etwa 90-95 %). Die Genauigkeit dieser Bahndaten liegt bei etwa 3 m. In der Arbeit [WANNINGER, 2000] wird jedoch von maximalen Abweichungen bis zu 50 m berichtet. Mit zunehmendem Alter der Ephemeridendaten wird in (<http://www.schriever.af.mil/GPS/>) eine Genauigkeitsverringering mit der folgenden Übersicht beschrieben:

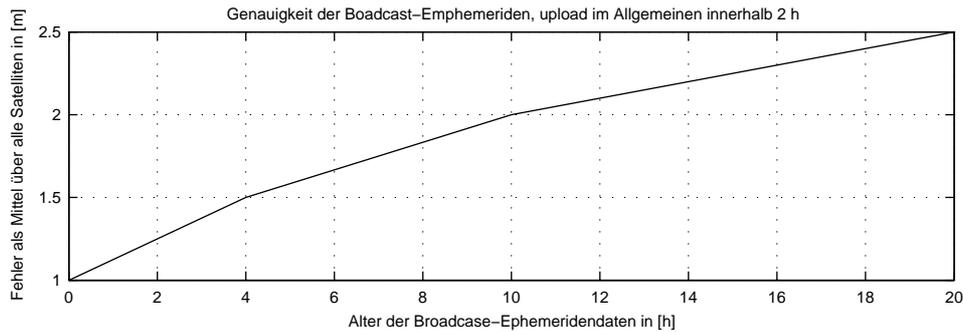


Abbildung 3.1: Zusammenhang des zulässigen Orbitfehlers mit dem Alter und der Genauigkeit der Ephemeriden

Beim post-processing können durch die Verwendung so genannter präziser Ephemeriden (Genauigkeit etwa 0,1 m, z. B. durch IGS verfügbar) höhere Genauigkeiten erzeugt werden. Außerdem sind rapid- und prädierte Ephemeriden verfügbar. Eine Formel zur Abschätzung des Orbitfehlers in Abhängigkeit der Basislinie ist in [BEUTLER, 1996] durch

$$\frac{|\delta \vec{l}|}{l} = \frac{|\delta \vec{O}|}{R} \quad (3.1)$$

dargestellt. Das Verhältnis des Orbitfehlers $|\delta \vec{O}|$ zum mittleren Erdradius R ergibt sich durch das Verhältnis des Basislinienfehlers $|\delta \vec{l}|$ zur Basislinienlänge l zwischen der Referenz- und der Roverstation. Die Auswirkung bei kinematischen Beobachtungen ist jedoch vernachlässigbar klein bzw. geht in der Messgenauigkeit unter.

Ionosphärische Refraktion

Die in einer Höhe von 10-1000 km freien Elektronen der Atmosphäre verursachen bei Mikrowellen dispersive Laufzeitverzögerungen und Strahlkrümmung, was sich direkt auf die GPS-Signale auswirkt. Nach [SEEBER, 1993] ergibt sich folgender Laufzeitfehler durch die ionosphärische Refraktion ΔR_{ION} entlang des Signalwegs S

$$\Delta R_{ION} = \int_S (n - 1) \cdot \delta s = \pm \frac{40,3}{f^2} \cdot \frac{1}{\cos(z^I)} \cdot \delta s = \pm \frac{40,3}{f^2} \cdot \frac{1}{\cos(z^I)} \cdot TEC \quad (3.2)$$

Der Brechungsindex wird mit n bezeichnet. Mit f wird die Frequenz (L1 oder L2) definiert und TEC ergibt sich aus dem „Total Electron Content“, als Elektronengehalt der Ionosphäre in einer Säule mit einer Grundfläche von 1 m² zwischen Empfänger und Satellit (Einheit $1 \cdot 10^{16}$ Elektronen/m², [LANYI u. ROTH, 1988]). Mit z^I wird der Zenitwinkel in einer mittleren Ionosphärenhöhe von etwa 350 - 400 km bezeichnet. Die zeitliche und räumliche Verteilung der Elektronen ist variabel, da sie in erheblichem Maße von den Parametern Sonnenflecken, geomagnetische Aktivitäten, Tages- und Jahreszeit sowie der geografischen Breite abhängt [STEIN, 1982].

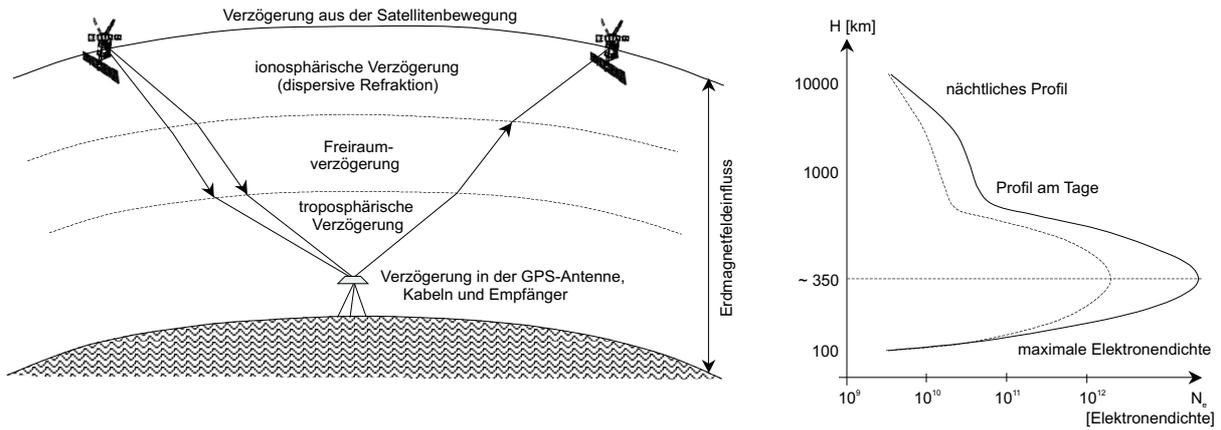


Abbildung 3.2: Höhenprofil der Elektronenverteilung in der Erdatmosphäre (Standardmodell)

Die aus den Code-Messungen berechneten Pseudorange-Entfernungen werden durch diese frequenzabhängige Störung verzögert (positives Vorzeichen von ΔR_{ION}). Die Beschleunigung des Trägerphasensignals wird aus dem negatives Vorzeichen errechnet. In [ROTHACHER, 2000] wird die Laufzeitverzögerung mit 3-60 ns angegeben. Bei der direkten Auswertung der Code-Messungen sollen Ionosphärenmodelle verwendet werden (z. B. unter (<http://www.cx.unibe.ch/aiub/ionosphere.html>) verfügbar). Bei Beobachtungen mit GPS-Empfängern kann durch die Bildung von doppelten Differenzen (sog. „double differencing“ - Eliminierung des Satellitenuhr- und Empfängeruhrfehlers aus der Differenzbildung von mindestens zwei Satelliten und zwei GPS-Empfängern, vgl. hierzu Abb. 3.6) eine größere Reduzierung erreicht werden. Kurzzeitige ionosphärische Störungen führen bei RTK-Lösungen oder längeren Datenausfällen zu einem verstärkten Auftreten von Phasensprüngen.

Troposphärische Refraktion

Unter der troposphärischen Refraktion versteht man die nicht dispersive Laufzeitverzögerung und Strahlkrümmung von Mikrowellen in der Tropo- und Stratosphäre. In Abhängigkeit vom Druck, der Temperatur (Komponente der Trockentemperatur, ca. 90 %) und vom Wasserdampfgehalt (feuchte Komponente, ca. 10 %) kann durch den empirisch gewonnenen Zusammenhang der **Smith-Weintraub-Gleichung** (Grundlage des Brechungsindex von feuchter Luft für Radiowellen mit Frequenzen zwischen 100 MHz bis 30 GHz)

$$\Delta R_{TRO} = \int_S (n - 1) \cdot ds = K_1 \frac{p}{T} + K_2 \frac{e}{T} + K_3 \frac{e}{T^2} \quad (3.3)$$

$$e = \frac{H}{100} \cdot \exp(-37,2465 + 0,213166 \cdot T - 0,000256908 \cdot T^2)$$

mit

- p = absoluter Druck,
- e = Partialdruck des Wasserdampfes,
- T = Absoluttemperatur und
- H = relative Feuchte in [%]

und der Anwendung der Koeffizienten K_1 , K_2 und K_3 (z. B. aus [ROTHACHER, 1992] mit $K_1 = 77,62$, $K_2 = 12,94$ und $K_3 = 371780$, Sammlung unterschiedlicher Werte aus der Literatur, vgl. [ZEBHAUSER, 2000]) die Laufzeitverzögerung bei der Echtzeitberechnung der GPS-Position berücksichtigt werden. In Abhängigkeit der entsprechenden Satellitenelevation muss die jeweilige Pseudorange-Messung mit

$$\Delta R_{TRO}(\zeta_S) = \frac{\Delta R_{TRO}(0)}{\cos(\zeta_S)} \quad (3.4)$$

für den Zenitwinkel ζ_S korrigiert werden. Mit dem „Ein-Schicht-Modell“ von Hopfield wurde die Grundlage zur Modellierung geschaffen [HOPFIELD, 1971]. Die unterschiedlichen Firmwareversionen im GPS-Empfänger verwenden modifizierte Hopfield-Modelle durch eine Aufspaltung der Beschreibung in einen Trocken- und Feuchtanteil und die Verwendung unterschiedlicher Konstanten für die Skalenhöhe. Erfahrungen aus statischen GPS-Auswertungen zeigen, dass eine Verwendung von unterschiedlichen atmosphärischen Modellen bei kleinräumigen Gebieten keinen Einfluss auf die Positionsgenauigkeit ergibt.

Mehrwegeausbreitung

Mehrwegeausbreitung entsteht, indem nicht nur das Satellitensignal direkt die Empfangsantenne erreicht, sondern auch an der Empfangsumgebung reflektiert wird (Interferenzbildung). Die Signalamplitude sowie die Messung des Codes und der Trägermischphase werden dadurch verfälscht. Der Einfluss ergibt sich durch die Reflexionseigenschaften in der Empfängerumgebung, wobei die Auswirkungen bei Code-Messungen hauptsächlich im Dezi-, bei Phasenmessungen im Zenti- und Millimeterbereich liegen. Zur Verringerung der Mehrwegeausbreitung bei C/A-Messungen wird immer häufiger die MEDLL-Technik (Multipath Estimating Delay Lock Loop) eingesetzt. Hierbei wird durch eine erhöhte Anzahl von Korrelationen während der Positionsberechnung eine Reduzierung des Mehrwegeeffekts erzeugt (vgl. z. B. [TAWNSEND, 1995]). Bei statischen GPS-Messungen kann durch Verwendung einer Choke-Ring-Antenne, Zweifrequenzempfängern und durch die Mittelbildung aus längeren Beobachtungszyklen dieser Einfluss minimiert werden. In der Dissertation [WIESER, 2002] werden unterschiedliche Ansätze zur Detektion und Kompensation von Signalverzerrungseffekten dargestellt und Algorithmen zur automatischen Erkennung und Eliminierung präsentiert. Als Grundlage der robusten Schätzung wird hier die *Fuzzy-Set* Theorie [HEINE, 1999] verwendet. Das Modell vereint streng statistische Größen mit unpräzisen Qualitätsmerkmalen mithilfe eines *Fuzzy-Controllers*. Bei kinematischen Beobachtungen werden häufig phasengeglättete Code-Beobachtungen mit geschätzten Signalstrukturen (z. B. bei den Leica-Empfängern die ClearTrakTM-Technologie zur Minimierung der Mehrwegeeffekte auf lediglich $\sim 1\%$, Ergebnisse siehe [EULER u. ZIEGLER, 2000]) verwendet. Vor allem bei GPS-Anwendungen im Bereich der Baumaschinensteuerung und in der landwirtschaftlichen Maschinenführung ist darauf zu achten, dass die GPS-Antennen (Einhaltung eines Mindestabstandes zur Maschine) vor Mehrwegeeffekten ausreichend geschützt ist.

Variation des Antennenphasenzentrums

Die GPS-Antenne empfängt das hochfrequente phasenmodulierte „Spread Spectrum-Signal“ der Satelliten. In Abhängigkeit der Elevation und des Azimuts des einfallenden Satellitensignals variiert das Phasenzentrum bei unterschiedlichen Antennen für Code- und Trägerphasenmessungen. Falsche Schätzungen im ionosphärischen und troposphärischen Modell wirken sich hier zusätzlich negativ aus. Das exakte Zentrum der Empfangsantenne ist nicht punktgenau definierbar, sondern muss als Fläche in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und Azimut des Satellitensignals betrachtet werden. In Labor- oder Feldkalibrierungen können diese Korrekturparameter ermittelt werden. Eine umfassende Beschreibung der Variabilität des Phasenzentrums (allgemeine Bestimmung des Phasenzentrums, Einfluss von Distanzfehlern, Ansatz verschiedener Antennenmodelle und zusätzlicher Störeinflüsse) wird in (GEIGER, 1988 oder GÖRRES, 2001) zusammengefasst. Ein IGS/NGS-Standard (National Geodetic Survey) dokumentiert die elevations- und azimutabhängigen Korrekturwerte für den gesamten Elevationsbereich von 0° bis 90° . Das Prinzip der relativen Feldkalibrierung beruht auf der Beobachtung kurzer Basislinien (einige Meter), die koordinatenmäßig bekannt sind. Die Differenzen zwischen der idealen und der tatsächlichen Signalfont (Code oder Phase) werden als Phasenzentrumsvariation (PZV) bezeichnet. Bildet man hingegen die Koordinatendifferenz aus Mittelwerten über einen längeren Beobachtungszeitpunkt, so erhält man den Phasenzentrumsoffset (PZO) für L1 und L2. Absolute Antennenkalibrierungen werden entweder im mikrowellentoten Messraum (anechoic chamber) mit künstlichen GPS-Signalen oder durch verschiedene Verkippungen und Rotationen an einem Kalibrierroboter über mehrere Tage durchgeführt. Verschiedene Firmen oder Services (z. B. <http://www.geopp.de/> oder ftp://igscb.jpl.nasa.gov/igscb/station/general/igs_01.pcv) führen solche Antennenkalibrierungen durch. Die Modellierung und Korrektur der Variation erfolgt durch Polygone (d. h. durch eine lineare Interpolation), Polynome oder Kugelfunktionsentwicklungen [ROTHACHER, 1995].

Das standardisierte Austauschformat zur Übertragung der Korrekturinformation **RTCM SC 104** (Radio Technical Commission for Maritime Services Special Commission 104, aktuelle Version 2.2, (<http://www.rtcn.org>) und Beschreibung im „RTCM Recommended Standards for Differential NAVSTAR GPS-Service, RTCM Paper 194-93/SC104-STD“ des ION) enthält gegenwärtig keine Option einer Übertragung von Antennenkorrekturparametern der Referenz- an die Roverstation. Die neue Version 2.3 soll jedoch in den Message Typen 23 und 24

die Beschreibung und Übertragung der Antennenparameter der Referenzstation beschreiben. Dadurch können die Parameter des PZV bei der Übertragung der Pseudorange-Korrektur oder der RTK-Referenzinformationen berücksichtigt werden. Gegenwärtig erzeugen unkorrigierte Messungen systematische Ablagen. Dies zeigen z. B. die OmniSTAR-korrigierten DGPS-Beobachtungen (Darstellung in Abb. 3.3 links als Lageplot und rechts als radialer Ablagevektor der Messpunkte zur Referenzinformation) an einem geometrisch bekannten Sollkreis mit dem Trimble AgGPS132 (L1-Empfänger). Der systematische Positionsfehler bewirkt hier kein zufälliges Messrauschen, sondern eine sinusförmige Funktion der radialen Ablagevektoren. Zur besseren Interpretation einer Kreistrajektorie bei GPS-Beobachtungen durch einen Hüll-, Minimum-, Pferch- oder Gauß-Kreis (Ellipse für Größe und Richtung der unterschiedlichen Variationen) können die Auswertestrategien für Kreismessungen in der Ingenieurvermessung nach [WEBER, 2000] oder einfach die Theorie einer bedingten Ausgleichung (Kreis oder Ellipsengleichung wird hier als Bedingung eingeführt, vgl. z. B. in [WASMEIER, 2002]) angewandt werden.

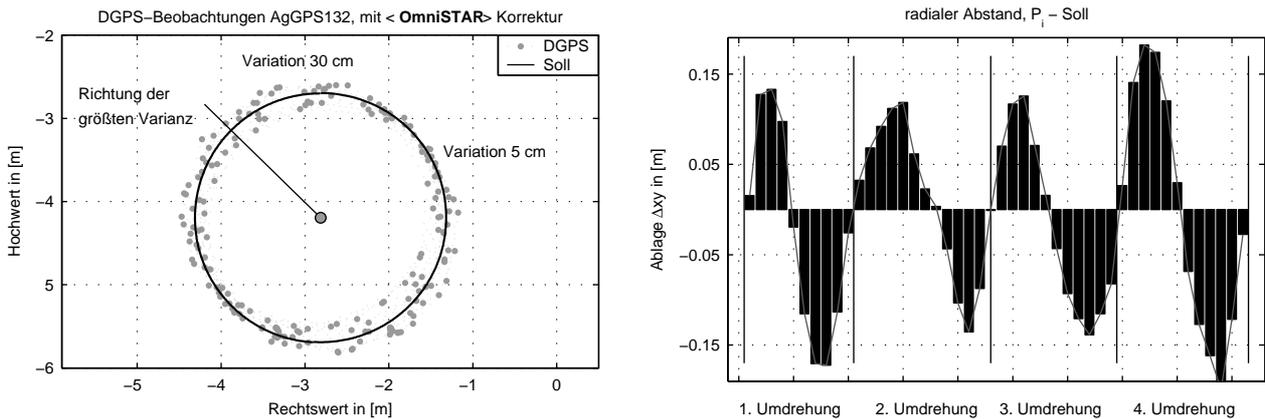


Abbildung 3.3: systematische Positionsfehler der DGPS Beobachtungen, u. a. durch die PZV

3.1.2 Stand-alone Verfahren

Die Verwendung eines autonomen GPS-Empfängers zur Einzelpunktberechnung (Single Point Positioning, SPP) wird als stand-alone Verfahren oder als Navigationslösung bezeichnet. Das seit 1994 vollständig ausgebaute Radionavigationssystem sendet zwei Trägerfrequenzen L_1 und L_2 mit aufmodulierten Navigationssignalen (P-, Y- und C/A-Codes) und -nachrichten aus. Die Laufzeitmessung zwischen dem Satellit i und dem Empfänger wird durch eine Verschiebung des kopierten Satellitensignals ermittelt. Da zwischen der Satellitenuhr und der Empfängeruhr ein Synchronisationsfehler in Bezug auf die GPS-Systemzeit existiert, wird für die Distanz- oder Laufzeitmessung der Begriff **Pseudostrecken-Messung** (Pseudorange P_E^S Observation, gesuchte Additionskonstante zur Entfernungsmessung zwischen Satellit und Empfänger) verwendet. Eine weitere genaue Methode zur stand-alone Messung kann durch die Umwandlung des bekannten P-Codes in den unbekanntem Y-Code (Anti-Spoofing A-S, Y-Code = P-Code + verschlüsselter W-Code) erreicht werden. Bei praktischen Messungen bedeutet dies, dass auf der Frequenz L_1 nur noch der ungenauere C/A-Code und auf L_2 keine Code-Korrelationsmessung mehr verfügbar ist (vgl. [BREUER et al., 1993]). Aus den Pseudostrecken-Messungen zwischen Satellit i und Empfänger ergibt sich durch die Gleichungen (2.5) bis (2.11) eine eindeutige Navigationslösung für jede Messepoche auf der Erdoberfläche. Die Genauigkeit der Koordinatentripel $(X_{E,i}, Y_{E,i}, Z_{E,i})$ jeder Messepoche aus der „broadcast message“ und den konvertierten GPS-Signalen ist in erheblichem Maße von dem Berechnungsalgorithmus sowie der Qualität der empfangenen Signale abhängig.

Der 1980 erstellte Industriestandard NMEA-0180 (Standard for Interfacing Marine Electronics Devices der National Marine Electronics Association) und 1983 auf den NMEA-0183 weiter entwickelte Standard ermöglicht eine Echtzeitberechnung und -ausgabe der GPS-Position für jede Messepoche. Durch eine serielle Übertragung können die Daten z. B. mit dem **RS232-Protokoll** direkt weiterverarbeitet werden. Abhängig vom Herstellertyp können verschiedene **NMEA-0183 Sentences** ausgegeben werden. Die folgende Auflistung (3.4) zeigt einige Beispiele des NMEA Protokolls einer GPS-Messepoche.

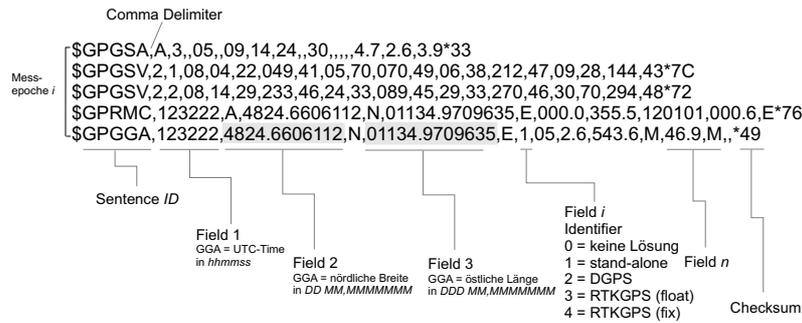


Abbildung 3.4: Struktur der NMEA-0183 Sentences

Bei den mobilen Ortungsaufgaben in Echtzeit werden meist die beiden Sentences GGA (*Global Positioning System Fix Data, Time, Position and fix related data for a GPS receiver*) und VTG (*Track made good and Ground Speed* mit der aktuellen Spur und der Geschwindigkeit) verwendet. Für die kinematische Echtzeit-Positionierung wird hierbei nur die Position (ggf. noch Zusatzinformationen wie Zeit, Satellitenanzahl und Field Identifier) benötigt. Eine komplette Übersicht aller NMEA-0183 Sentences und Pinbelegungen findet man z. B. unter (<http://www.nmea.de> oder <http://www.nmea.org>). Wegen der zunehmenden Bedeutung der Echtzeitortung von Arbeitsmaschinen ist der BUS-fähige NMEA2000 Standard weiter entwickelt worden. Die Kommunikationsüberwachung zwischen GPS-Empfänger und dem Steuergerät der mobilen Arbeitsmaschine erlaubt dem Benutzer die Überwachung der Kommunikation auf symbolischer Ebene. Zur Auswahl steht die Interpretation als „NMEA Application-Layer“ sowie der CAN-Botschaften (Controller Area Network, physikalisches Kommunikationsmedium der Fa. Bosch, <http://www.can.bosch.com>) „Data Length Code“ und Datenbytes. Diese neue Schnittstelle bietet einen effizienten und schnellen Datenaustausch zwischen dem Ortungssensor und den Arbeitsmaschinen im Bauwesen sowie in der Landwirtschaft. Der Trimble AgGPS132 ist einer der wenigen GPS-Empfänger, bei dem eine NMEA2000-Ausgabe bereits realisiert wurde.

In der Regel werden die phasengeglätteten Pseudorange mit einfachen Echtzeitberechnungsalgorithmen im Empfängerprozessor berechnet. Die übertragenen Daten (Zeit und Positionsinformationen) müssen anschließend in ein brauchbares Format konvertiert werden. So wird die geografische Breite (vgl. Abb. 3.4)

$$B_{NMEA} \text{ im Format } DDMM,MMMMMM \text{ z. B. } 4824,6606112 \quad (\text{mit } DD \text{ in Grad und } MM \text{ in Minuten})$$

und die geografische Länge

$$L_{NMEA} \text{ im Format } DDDMM,MMMMMM \text{ z. B. } 01134,9709635$$

des NMEA-Formats mit

$$B(DMS) = DD(Grad) \quad MM(Min) \quad 0,MMMMMMMM \cdot 0,6 \quad (3.5)$$

$$L(DMS) = DDD(Grad) \quad MM(Min) \quad 0,MMMMMMMM \cdot 0,6 \quad (3.6)$$

in

$$4824.6606112 = 48^\circ \quad 24' \quad 0,6606112 \cdot 0,6 = 48^\circ \quad 24' \quad 39,63667''$$

$$01141.9709635 = 11^\circ \quad 41' \quad 0,9709635 \cdot 0,6 = 11^\circ \quad 41' \quad 58,25781''$$

(Grad, Minuten und Sekunden) oder mit

$$B(GRD) = DD(Grad) + \frac{MM,MMMMMMMM(Min)}{60} \quad (3.7)$$

$$L(GRD) = DDD(Grad) + \frac{MM,MMMMMMMM(Min)}{60} \quad (3.8)$$

in

$$4824,6606112 = 48, + \frac{24,6606112}{60} = \mathbf{48,4110101}$$

$$01134,9709635 = 11, + \frac{34,9709635}{60} = \mathbf{11,5828494}$$

(Grad in dezimal) umgewandelt. Die ellipsoidische Höhe wird mit dem im Empfänger integrierten grobmaschigen globalen Modell der Geoidhöhe ausgegeben. Diese Höhenangabe wird in der NMEA-Beschreibung als „Mean Sea Level, (MSL)“ bezeichnet. Unterschiede wie z. B. bei einem SR530 Leica-Datensatz (ellipsoidische Höhe und Geoidhöhe bereits addiert) zum Trimble AgGPS132-Datensatz (ellipsoidische Höhe und Geoidhöhe getrennt) zeigen, dass das standardisierte NMEA-0183 Protokoll nicht bei allen GPS-Empfängerherstellern gleich realisiert wurde:

-Leica- \$GPGGA,104638.00,4824,6606112,N,01134,9709635,E,3,07,1.5,590.980,M,,0.00,0000*24

-Trimble- \$GPGGA,104638.00,4824.660955,N,01134.971153,E,2,06,1.2,544.41,M,47.56,M,7.0,0101*4E

Sowohl die Formatlänge als auch die Messwerte (Leica-Empfänger 7 Satelliten, Trimble-Empfänger 6 Satelliten) zur selben UTC-Zeit und Position sind nicht identisch. Auch die verwendeten Geoidhöhen sind bei nicht baugleichen GPS-Empfängern verschieden. Bei der Verwendung von Gebrauchshöhen muss das den Vermessungsverwaltungen der Länder und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) eingeführte satellitengeodätisch-nivellitische Quasigeoid (z. B. Geoid-/Quasigeoidmodell EGG97, Unterschied nach der Abschätzungsformel der Bouguer Anomalie mit $(\zeta - N) = \Delta g_{in\ gals} \cdot H_{in\ km}$ gleich wenige Dezimeter [HEISKANEN u. MORITZ, 1967]) berücksichtigt werden. So ergeben sich auf der Basis der Formeln von [DENKER, 1989] mit dem GIBS-Service (nationales GPS-Informations- und Beobachtungssystem des BKG in Frankfurt unter <http://gibs.leipzig.ifag.de>) für diese Position folgende Werte:

SYSTEM	LAT in [GRD]	LON in [GRD]	Q-GEOID in [m]	XI Nord in ["]	ETA Ost in ["]
IfE89	48,4110101	11,5828494	45,217	-2,4	3,6
DHDN/NN	48,4110101	11,5828494	-5,742	-5,9	0,3
ED50/NN	48,4110101	11,5828494	-1,184	-5,4	1,1

Tabelle 3.2: Quasi-Geoidhöhe für die angegebene Position nach [DENKER, 1989]

Neben der Angabe der beiden Lotabweichungen XI und ETA (wichtig bei der Verwendung „steilen“ Zenitwinkeln im Vergleich zu den GPS-Höhen) ist hier der genaue Wert des Quasigeoids für die gemessene Position mit dem grobmaschigen Wert des DGPS-Empfängers zu vergleichen (47,56 m mit 45,217 m, Beachtung beim Einsatz von unterschiedlichen GPS-Empfängern, evtl. sollen hier immer die gleichen Werte für die Quasi-Geoidhöhe verwendet werden). Die zweite Möglichkeit besteht in der epochenweisen Registrierung der GPS-Rohdaten in einem firmenspezifischen Datenformat und der Auswertung mit einer geodätischen GPS-Auswertesoftware (z. B. bei Leica SKI-Pro der **Statisch-KInematisch-Professionellen** GPS Software für post-processing) oder in der eigenen Berechnung mit den ASCII-konvertierten RINEX GPS-Rohmessdaten.

Mit der gegenwärtigen Satellitenkonstellation können in stand-alone Verfahren (Echtzeit NMEA Ausgabe) Positionsgenauigkeiten von etwa $1\sigma = \pm 10$ m und nach [ROTHACHER, 2000] etwa $1\sigma = \pm 2$ m (Auswertung einzelner Epochen) von Y- bzw. P-Code erreicht werden. Die Ablagevektoren der in kinematisch beobachteten Positionen zu einem koordinatenmäßig bekannten WGS84 Punkt zeigen, dass ein Unterschied bezüglich den kostengünstigen hand-held- (L1-Empfänger ab 150 EURO), low-cost- (L1-Empfänger ab 750 EURO) sowie geodätischen GPS-Empfängern (L1/L2-Empfänger, mehrere 1000 EURO) existiert. Die unterschiedliche Verarbeitung der Signale und Positionsberechnungsalgorithmen mit integrierten Filter- und Glättungsverfahren ergeben bei diesen Produkten die in der Abbildung (3.5) dargestellten statischen Positionsgenauigkeiten in Lage und Höhenplot.

Die Verteilung der Lage- und Höhenkoordinaten des Trimble AgGPS132 weist eine geringe Variation ohne oder vor allem mit dem Positionsfiler (pv) auf. Der zur Führung von landwirtschaftlichen Maschinen abgestimmte GPS-Empfänger verdeutlicht den Einfluss von phasengeglätteten Code-Messungen und Positionsfilttern. Die im stand-alone aufgenommenen Positionen des geodätischen Leica SR530 (L1/L2-Empfänger) liegen im selben

Genauigkeitsbereich. Die Variationen von low-cost-GPS-Empfängern, in diesem Beispiel der Garmin eTrex (L1-Empfänger), ergeben durch die vereinfachten Hard- und Softwarekomponenten eine um etwa den Faktor 2-3 größere Messunsicherheit. Untersuchungen mit GLONASS-Empfängern wurden hier nicht durchgeführt.

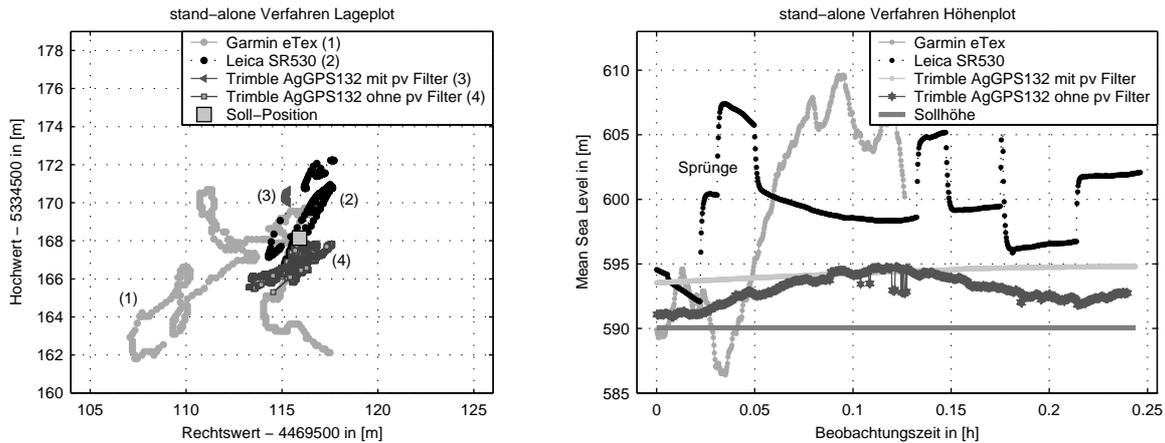


Abbildung 3.5: Vergleich unterschiedlicher GPS-Empfänger im stand-alone Mode

3.1.3 Differentielles GPS-Verfahren

Zur Steigerung der Positionsgenauigkeit können Differenzen aus simultanen GPS-Beobachtungen (Referenzstation auf einen koordinatenmäßigen bekannten Sollpunkt, Roverstation unbekannt) verwendet werden. Dadurch wird vor allem der zeitabhängige Fehler verringert. Bei der einfachsten Methode einer DGPS-Positionsbestimmung (Relativpositionierung) werden die an einer Referenzstation fixierten Positionen als Differenzvektoren (Δx , Δy und Δz) an der Roverstation angehängt. Die dadurch erhaltenen Koordinatenunterschiede ergeben eine Relativpositionierung bezogen auf die Referenzposition. Sind die Koordinaten des stationären Empfängers ($X_{Ref}, Y_{Ref}, Z_{Ref}$) in einem äquivalenten Bezugsrahmen bekannt, so ergeben die Koordinatenschläge der Referenzstation aus gemessen-Soll die Roverkoordinaten ($X_{Rov,i}^{korr}, Y_{Rov,i}^{korr}, Z_{Rov,i}^{korr}$) für kurze Basislinien. Bei handelsüblichen Echtzeit DGPS-Empfängern werden die Pseudorange (berechnet aus **Codemessungen**; DGPS-Messungen aus Trägerphasenmessungen werden im Absatz 3.1.4 erläutert) durch die Differenzen jeder Entfernungsmessung zum Satelliten über das RTCM-Format korrigiert. Werden zur Bildung der Differenzen nicht die selben Satelliten in der Referenz- und Roverstation verwendet, so kann für diese Satelliten keine Pseudorange-Korrektur zur Positionsbestimmung angewendet werden (siehe Abb. 3.6). Das Grundprinzip differentieller Pseudorange-Messungen wird in der nachfolgenden Grafik erläutert. Es können nur Satelliten zur Bildung der doppelten Differenzen zwischen der Referenz- und Roverstation verwendet werden, die zeitgleich von beiden Stationen beobachtet werden können.

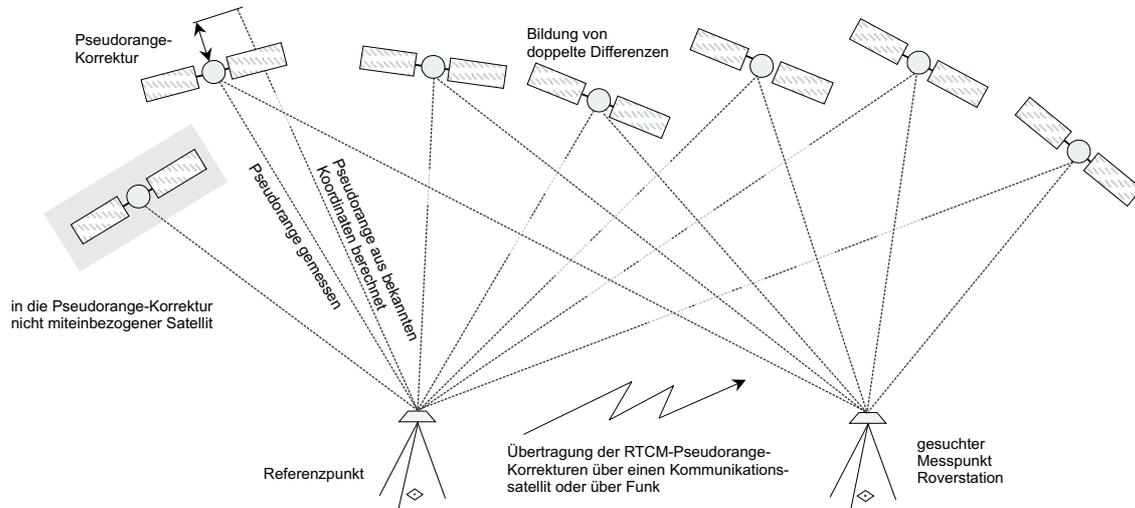


Abbildung 3.6: Pseudorange-Korrektur Referenz- zur Roverstation

Die zur Pseudorange-Korrektur jedes beobachteten Satelliten errechneten Streckenzuschläge im RTCM-File (Beispiel siehe unter Tab. 3.3) ergeben sich aus der vereinfachten Grundgleichung (ohne Berücksichtigung der aufgeführten Fehler in der Gleichung 2.7, vgl. Bezeichnungen ebenfalls aus dieser Darstellung für den Rover und der Referenzstation) mit

$$\Delta PR_{Ref,Rov}^{S,i} = PR_{Ref}^{S,i} - PR_{Rov}^{S,i} = R_{Ref}^{S,i} - R_{Rov}^{S,i} - (\Delta T_{Ref}^{S,i} + \Delta T_{Ref}^E - \Delta T_{Rov}^{S,i} - \Delta T_{Rov}^E) \cdot c. \quad (3.9)$$

Da für die beiden unbekanntten Größen der Ansatz $T_{Ref}^E = T_{Rov}^E$ gilt, kann durch einfache Differenzbildung der Empfängeruhrfehler weitgehend eliminiert werden. Voraussetzung ist, dass der Referenz- und Roverempfänger die GPS-Zeitskala ausreichend synchronisieren. Außerdem werden bei kurzen Basislinien die atmosphärischen Laufzeitfehler reduziert. Die bei mehr als vier Satelliten redundanten Beobachtungsgleichungen werden durch eine Ausgleichung während der Positionsberechnung berücksichtigt. Die erreichbaren DGPS-Genauigkeiten sind sehr stark abhängig von der Güte der Pseudorange-Korrekturinformation und vom Algorithmus zur Positionsermittlung.

Der IGS bietet regionale und globale Referenzstationsnetze für GPS-post-processing Aufgaben an. Für Echtzeitanwendung von Pseudorange-korrigierten Code-Messungen werden terrestrische Verfahren angeboten. So existieren zur Pseudorange-Korrektur in lokale Gebiete so genannten „Local Area GPS-Dienste, LAGPS“, wie z. B. **AMDS, BEACON, SAPOS ALF und RASANT**, etc. über Funk-UKW, Langwelle oder Mobilfunk und für globale Korrekturinformationen so genannte „Wide Area DGPS-Dienste, WADGPS“ wie **OmniSTAR, WAAS, LAAS, LandStar, Eurofix über Loran C, EGNOS**, etc. (siehe http://gibs.leipzig.ifag.de/cgi-bin/Info_dgp.cgi?de). Die über einen Kommunikationssatelliten abgestrahlten Korrekturinformationen stellen eine viel bessere Verfügbarkeit gegenüber den von der Topografie abhängigen Funkwellen dar. Fugro OmniSTAR betreibt weltweit über 70 Referenzstationen und 3 Network Control Center (<http://www.omnistar.com>). Die verschiedenen geostationären Kommunikationssatelliten (z. B. Europa EMS) erreichen somit eine etwa 95 %-ige Abdeckung. Zur Nutzung der binär versendeten RTCM-Daten ist eine entsprechende Decoderbox (Übersicht der verschiedenen Anbieter unter <http://www.potsdam.ifag.de/alf/>) erforderlich. Um die Genauigkeit der DGPS-Position zu steigern, wird ggf. das Verfahren der virtuellen Referenzstation zur Berechnung der Formel (3.9) verwendet. In [WANNINGER, 2002] wird sowohl die Fehlermodellierung als auch das Konzept und die Berechnung von virtuellen Referenzstationen detailliert aufgeführt. Eine weitere Option zur Genauigkeitssteigerung (nach [DITTRICH u. KÜHMSTEDT, 2000] etwa 50 % in der Lage) kann bei dem Langwellen-DGPS-Service des BKG „Accurare Positioning by Low Frequency“ (ALF) mit der „Azimuth-Distance-Correction (ADCo)“ erreicht werden. Dieses verbesserte und patentierte System **ALF/ADCo** wurde inzwischen in einige Empfänger wie den GS50 von Leica oder im GEOMeter24 der Fa. GEOsat implementiert. Dabei ist eine Steigerung der Positionierungsgenauigkeit von etwa $\pm 2,5$ m bei ALF auf etwa $\pm 1,0$ m bei ALF/ADCo erreicht worden.

Ein Vergleich mit den zwei simultan registrierten Pseudorange-Korrekturen aus SAPOS-ALF (bezogen auf die Referenzstation Mainflingen) und OmniSTAR (virtuelle Referenzstation in diesem Fall für Freising) mit dem Leica SR530-Empfänger zeigt, dass die jeweiligen Pseudorange-Zuschläge komplett unterschiedlich sind. Die auf die jeweiligen Referenzstationen bezogenen Abweichungen zum Satellit i variieren somit wegen dem unterschiedlichen Azimut und der Elevation um mehr als 15 m pro Satellit. Hingegen variieren die aus den unterschiedlichen Pseudorange-Korrekturdiensteanbietern berechneten DGPS-Positionen nur im bekannten Metergenauigkeitsbereich (siehe Abb. 3.7 abschattungsfreie Beobachtungen, Ablage zu einem gemittelten WGS84 Punkt).

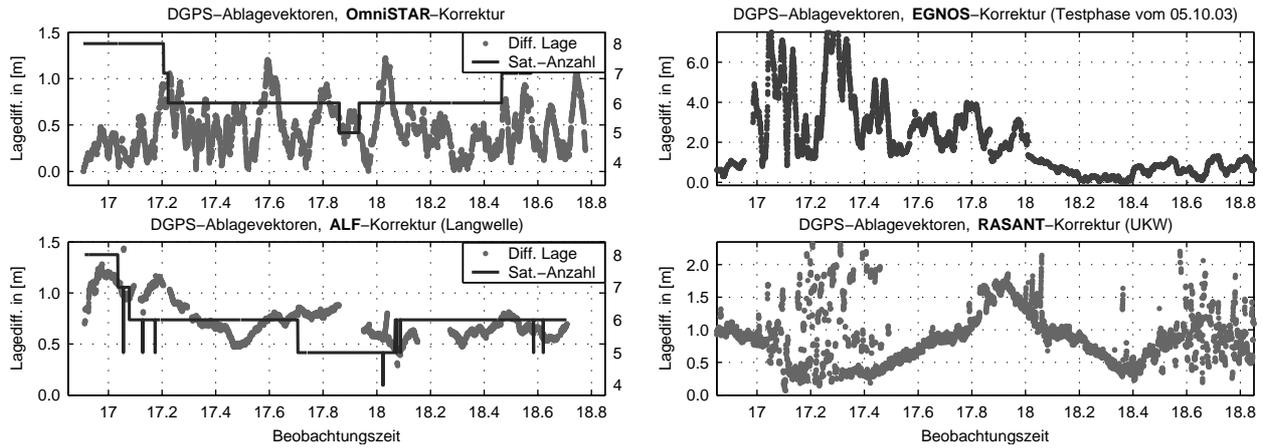


Abbildung 3.7: Vergleich identischer Messungen mit unterschiedlichen Korrekturinformationen am Leica SR530

Beim Vergleich einer identischen RTCM-Korrekturperiode von ALF und OmniSTAR Daten wird dieser Unterschied deutlich (SV = Number of Space Vehicles, UDRE = User differential range error, PRC Pseudorange correction in m, RRC = range rate correction und IODE = issue of data).

OmniSTAR						SAPOS-ALF						Diff.
SV	UDRE	PRC	RRC	IODE		SV	UDRE	PRC	RRC	IODE		
2	0	-5.04	0.000	208		2	0	-17.84	0.002	208	12,80	
3	0	4.14	0.000	160		3	0	-10.64	0.000	160	14,78	
6	0	-33.42	0.000	43							-	
15	0	-1.32	0.000	226		15	0	-16.76	0.000	226	15,44	
17	0	26.78	0.000	213		17	0	14.02	0.002	213	12,76	
18	0	0.04	0.000	24		18	0	-16.18	0.000	24	16,22	
21	0	-5.48	0.000	132		21	0	-22.00	0.000	132	16,52	
22	0	-0.56	0.000	86		22	0	-16.34	0.002	86	15,78	
23	0	-1.12	0.000	145		23	0	-16.94	-0.002	145	15,82	
26	0	-31.12	0.000	159							-	
27	0	-22.24	0.000	161		27	0	-32.38	-0.002	161	10,14	
31	0	-18.16	0.000	157		31	0	-31.52	0.000	157	13,36	

Tabelle 3.3: Beispiel der RTCM-Korrekturdaten einer identischen Epoche ZCNT 1380, Mittelwert Diff. = 14,36 m

Der Verlauf an vier ausgewählten Satelliten (SV 15, 18, 22 und 23) zeigt ein ähnliches Verhalten bzgl. der Streckendifferenzen (siehe Abb. 3.8). Außerdem kann aus dieser Darstellung entnommen werden, dass das Alter der Korrekturinformation wegen der geringen Änderung pro Zeiteinheit keine wesentliche Auswirkung auf die berechnete Position hat. Dies gilt jedoch erst seit Abschaltung von S/A. D. h., die Synchronisation zwischen der Berücksichtigung der Pseudorange-Korrektur während der Positionsberechnung im Rover und dem Zeitpunkt der Bestimmung von PRC wirkt sich mit einer Verzögerung von 10 - 20 Sekunden nicht genauigkeitsmindernd aus.

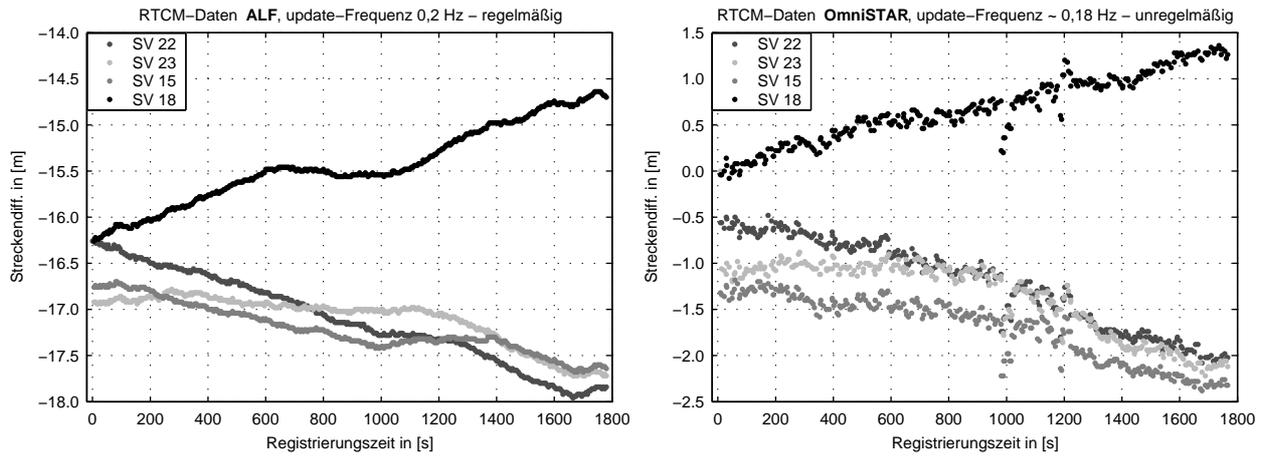


Abbildung 3.8: Vergleich der Pseudorange-Korrekturen an ausgewählten vier Satelliten

Ein konstanter Offset aus den DGPS-korrigierten Positionen (unterschiedlicher Korrekturdienstanbieter mit unterschiedlichen Positionen der Referenzantennen oder durch virtuelle Referenzstationen [WANNINGER, 2000]) kann deshalb nur aus dem Anschluss an verschiedene Bezugssysteme resultieren. Sonst liegt die Position in der Regel immer innerhalb des DGPS-Genauigkeitsbereichs von $\sigma = 1\text{-}2$ m. Am Beispiel einer statischen Beobachtung mit dem Trimble AgGPS132 und OmniSTAR DGPS-Korrekturen wird die Messunsicherheit exemplarisch dargestellt. Aus der ION STD 101 wird zur Aufteilung und Darstellung der Lage-, Höhen- und 3-D-Genauigkeit folgender Zusammenhang ($\Delta PPRE = 3\text{-D}$, $\Delta UPRE = \text{Lage-}$ und $\Delta HPRE = \text{Höhengenauigkeit}$)

$$\Delta PPRE = \sqrt{(\Delta HPRE^2 + \Delta UPRE^2)} \quad (3.10)$$

verwendet.

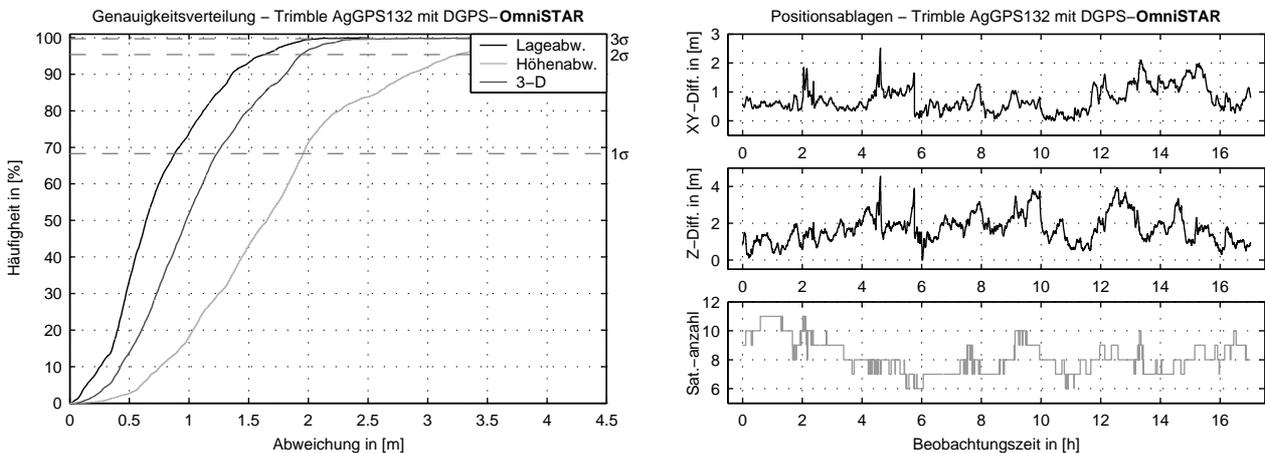


Abbildung 3.9: Positionsgenauigkeit statischer DGPS-Messungen

Nach der Terminologie des ION STD 101 schreiben sich die Ergebnisse gemäß der nachfolgenden Tabelle (3.4).

ACCY-MEAS	68,3 % (1σ) in [m]	95,4 % (2σ) in [m]	99,7 % (3σ) in [m]	100: Max in [m]	0: Min in [m]	NAV-Mode	DGPS
Δ HPRE	1,96	3,26	3,84	2,94	-1,61	3-D	Y
Δ UPRE	0,88	1,63	2,01	2,52	0,00	3-D	Y
Δ PPRE	1,23	1,94	2,68	3,87	0,06	3-D	Y

Tabelle 3.4: GPS-Genauigkeitsdarstellung, Terminologie aus dem ION STD 101

Jeder Empfänger verarbeitet diese Korrekturinformationen unterschiedlich. Dies kann im Extremfall sogar dazu führen, dass der Algorithmus die PRC falsch interpretiert und somit eine geringere Positionsgenauigkeit als bei unkorrigierten Positionen ausgibt. Untersuchungen mit dem hand-held Empfänger Garmin eTrex der NMEA-Positionen zeigen, dass die RTCM-Pseudorange-Korrekturen hier zu einer geringeren Genauigkeit (Faktor 2 - 3 geringer) als im stand-alone Modus führen (siehe Abb. 3.10). Der Identifier im NMEA-Protokoll zeigte während der Messung stets den Wert 2 (PRC durchgeführt) an. Da man hier keinen Zugriff auf die Rohdaten hat, kann dieses Problem nicht gezielter analysiert werden. Hierzu muss man entweder auf geodätische GPS-Empfänger mit RINEX-Ausgabe zurückgreifen oder mit eigenständigen GPS-Entwicklungsumgebungen, wie z. B. der *iSuite* und *iTrax02* von der Fa. Fastrax (<http://www.fastrax.fi>) arbeiten.

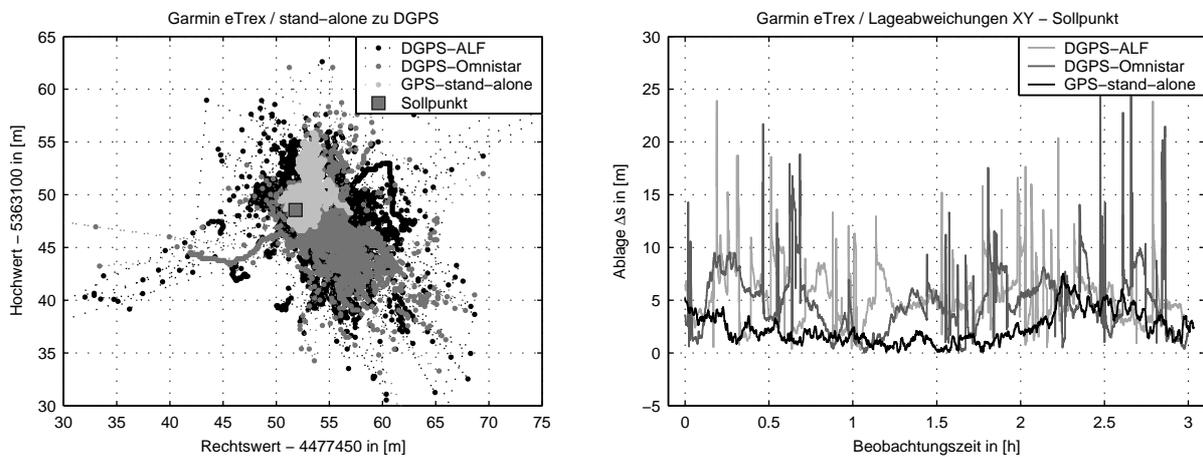


Abbildung 3.10: fehlerhaft berechnete DGPS-Positionen beim Garmin eTrex

3.1.4 RTKGPS-Verfahren

Das **Real-Time-Kinematic DGPS**-Verfahren basiert auf der **Trägerphasenmessung** als grundlegende Beobachtungsgröße. Aus der Anzahl der Phasenzyklen und dem Phasenreststück werden bei diesem differentiellen GPS-Verfahren die Entfernungen zwischen dem Satellit i und den beiden Empfängern (Referenz und Rover) durch die Trägerphasenbeobachtung $\Phi_E^{S,i}$ berechnet (vgl. Grundgleichung 3.11). Die Relativpositionierung mit der Trägerphase L1 und L2 erfolgt wie bereits bei dem DGPS-Verfahren durch Bildung von doppelten Differenzen. Die Schwierigkeit dabei ist zum einen die Bestimmung der **Phasenmehrdeutigkeit** (ambiguity) $A_E^{S,i}$ sowie die Eliminierung auftretender Phasensprünge (cycle slips, Verlust der Anzahl von Wellenlängen in der gemessenen Grundträgerphase aus dem Phasenabriss des GPS-Signals). Noch vor wenigen Jahren erforderte die Bestimmung von $A_E^{S,i}$ aufwändige Verfahren wie das Antennen-Swap. Die Arbeit [FREI, 1991] hat durch das Verfahren „Fast Ambiguity Resolution Approach“ (FARA) gezeigt, dass mithilfe von L1 und L2 Beobachtungen in einem Zeitraum von ein bis zwei Minuten bereits eine Phasenmehrdeutigkeitslösung durchgeführt werden können. Anfang der 90iger Jahre wurde das Verfahren „fast GPS ambiguity resolution method on the fly for RTK-application“, (z. B. [EULER u. LANDAU, 1992]) von verschiedenen Herstellern angeboten. Zwischenzeitlich haben sich die Hardwarekomponenten des Signalempfangs und -weiterverarbeitung (z. B. beim Ashtech-Empfänger mit der Instant-RTKTM-Technologie [ABOUSALEM et al., 2001]) erheblich verbessert. Zum anderen sind die Algorithmen zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeit und zur Minimierung von Multipath stetig optimiert worden. Die verschiedenen RTKGPS-Empfängertypen benötigen heute nur noch wenige Sekunden

[CZAJA, et al., 2001]. In der neuen Leica SKI-Pro Version 3.0 ist der Kernel (Berechnungsalgorithmus) identisch mit dem RTK-Kernel im SR530 Empfänger. Somit kann auch beim post-processing für jede Messepoche eine unabhängige Phasenmehrdeutigkeitslösung berechnet werden. In [ZEBHAUSER, 2000] wird ein Verfahren vorgestellt, das die Bestimmung von reellwertigen Mehrdeutigkeiten der Beobachtungsgleichung

$$\Phi_E^{S,i}(L1, L2) = R_E^{S,i} + \lambda_{L1,L2} \cdot A_E^{S,i} + c_{trop} + c_{iono} + c_{mp} + c_{noise} \quad (3.11)$$

mit

- $R_E^{S,i}$ geometrische Strecke zwischen dem Satellit i und Empfänger,
- $\lambda_{L1,L2}$ Wellenlänge der beiden Trägerphasen im L1/2-Band,
- c_{trop} Troposphärenmodell,
- c_{iono} Ionosphärenmodell,
- c_{mp} Fehler aufgrund von Multipath und
- c_{noise} Signalrauschen

genauer beschreibt. Die Leistungsfähigkeit von RTKGPS-Beobachtungen entspricht den bekannten Genauigkeiten aus den statischen Anwendungen von wenigen Zentimetern bei kurzen Basislinien. Kurzzeitige Messungen von einigen Minuten (ähnliche Satellitenkonstellation) entlang einer bekannten Sollgeometrie zeigen sogar eine relative Lagegenauigkeit von etwa ± 5 mm (vgl. Abb. 3.11). Durch die neue „Ambiguity Resolution Function“ [HOFFMANN-WELLENHOF, et al. 2001] wird des Weiteren ständig im Hintergrund der Messung eine Prüfroutine zur Phasenmehrdeutigkeitslösung mehrfach in der Sekunde durchgeführt.

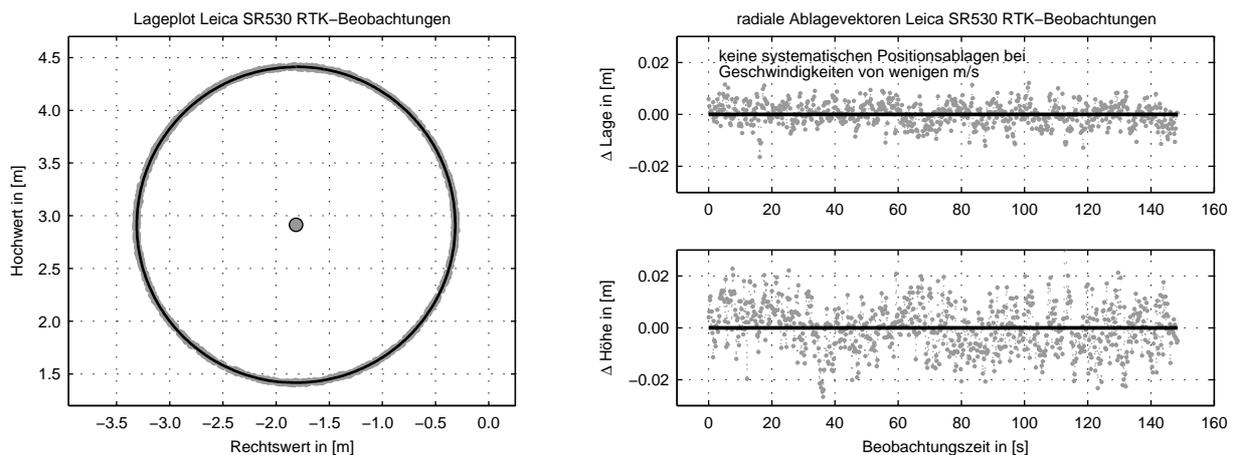


Abbildung 3.11: RTKGPS-Genauigkeit an einem geometrisch bekannten Sollkreis (ideale äußere Bedingungen)

Beobachtungen über mehrere Stunden weisen die bekannten Variationen im Bereich von mehreren Zentimetern auf. Diese RTKGPS-Genauigkeitsdarstellungen sind unter idealen Messbedingungen, d. h. ungestörte Satellitensichtbarkeit, Minimierung von Multipath-Effekten und Abschattungseinflüssen, registriert worden. Unter normalen Arbeitsbedingungen auf mobilen Maschinen können Ablagen zur Sollinformation von einigen Dezimetern auftreten. RTKGPS-Messungen mit zwei fest installierten Rovern auf dem Dach eines Schleppers (konstanter Abstand zwischen beiden RTKGPS-Antennen von 2 m) während einer Bodenbearbeitung zeigen, dass die Ablagen mehr als ± 2 dm betragen.

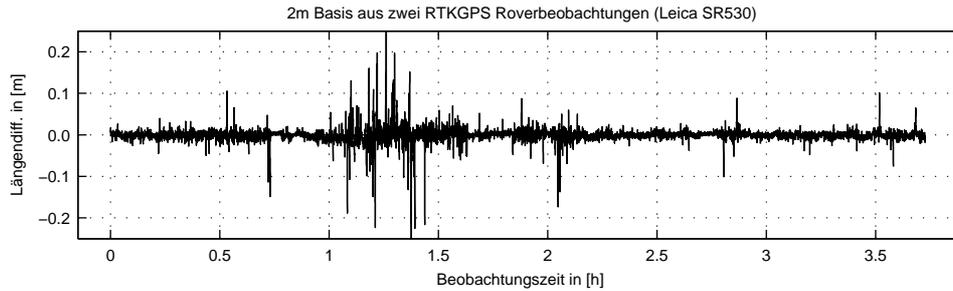


Abbildung 3.12: Überprüfung der konstanten Basis auf einer mobilen Arbeitsmaschine

Verschiedene Untersuchungen bzgl. des Genauigkeitsvergleichs zwischen RTK- (Registrierung weniger Messepochen) und post-processed (min. fünf Minuten Rohdatenaufzeichnung, rapid static) GPS-Daten wurden bereits vielfach durchgeführt und veröffentlicht (z. B. [ILLNER, 2002]).

3.2 Fehlereinflüsse bei kinematischen Anwendungen

3.2.1 Parameterbestimmung

Aufbauend auf den bekannten Fehlereinflüssen statischer GPS-Messungen müssen bei kinematischen Echtzeitanwendungen zum einen die bewegungs- und zum anderen die zeitabhängigen Einflussgrößen verifiziert werden. Vergleichende Untersuchungen mit identischen Umgebungsverhältnissen ergaben, dass bei Bewegungsgeschwindigkeiten von einigen Metern pro Sekunde der Signalempfang, die Satellitenanzahl, das Signal-/Rauschverhältnis und die Ablagevektoren zum Sollpunkt bzw. zur Sollspur keine signifikanten Unterschiede aufweisen. Die Leistungsfähigkeit der GPS-Systeme ist nicht durch die Bewegungsart- und -geschwindigkeit (Untersuchungen bis etwa 5 m/s) eingeschränkt.

Ein grundlegendes Problem kinematischer Genauigkeitsuntersuchungen liegt in der präzisen Bestimmung der Sollpositionen. Bei statischen Auswertungen von GPS-Beobachtungen ist ein 3-D-Ablagevektor zu einem Mittelwert oder bekannten Sollwert einfach aus der Differenz zu errechnen. Bei kinematischen Beobachtungen ist es sehr schwierig, einen genauen Sollpunkt zur Messepoche i zu erhalten. Deshalb wird oft nur eine orthogonale Abstand zum Bewegungsmodell als Ablagevektor ΔP_i kinematischer Genauigkeitsbetrachtungen angegeben. Die folgende Skizze verdeutlicht diesen Sachverhalt.

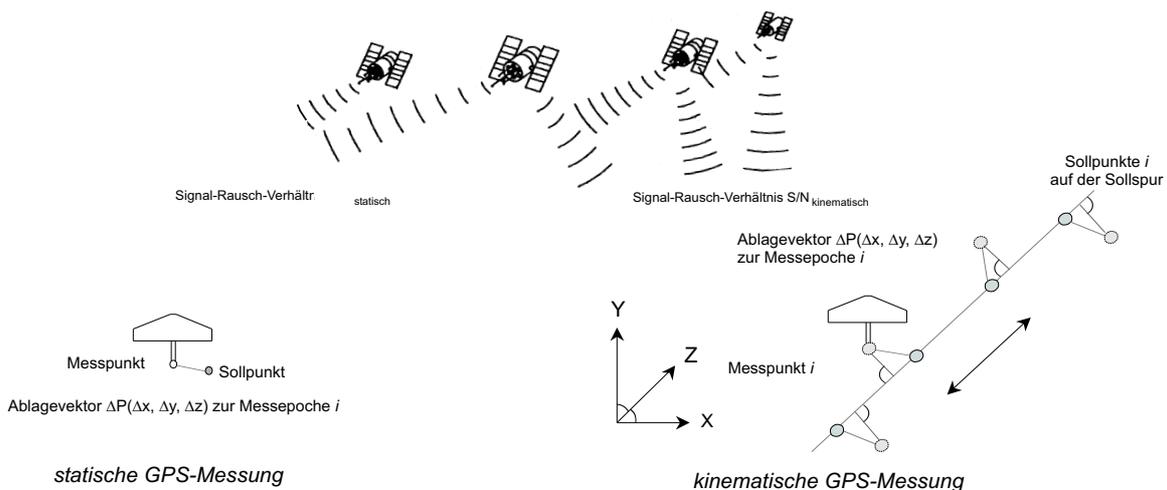


Abbildung 3.13: Signal- und Positionsvergleich statischer und kinematischer GPS-Messungen

Natürlich wirken sich bei praktischen Anwendungen die Messbedingungen wie Abschattungen, Signalreflexionen, Umgebungsverhältnisse und Satellitenkonstellation direkt auf die Ergebnisse aus. So wurde z. B. in der Arbeit [HAMBERGER, 2001] der Einfluss des Feuchtegehalts von Bäumen für kinematische GPS-Messungen

untersucht und dargestellt. Außerdem treten in den verschiedenen Anwendungen der Maschinensteuerung- und führung variierende Verkippungen der GPS-Antenne in Abhängigkeit der Geländeformen auf. Dies muss bei der Reduktion der PZV berücksichtigt werden. Des Weiteren kann auf unserer geografischen Breite (München etwa $48^{\circ} 09'$) bei einer ungünstigen Satellitenkonstellation (Satellitenanzahl, Azimut und Elevation) und einer **starken Neigung** der Antenne nach Süden wegen der Bahnneigung des GPS-Systems (Inklination 54°) keine Position des GPS-Empfängers errechnet werden.

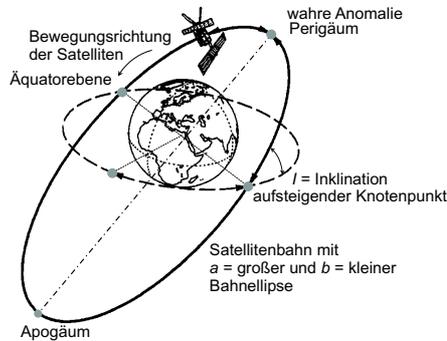


Abbildung 3.14: Beschreibung der Satellitenbahn durch die Kepler-Elemente (6 Parameter)

In [WUNDERLICH, 1993] wurde diese Problematik vertieft bearbeitet und über das polare Sichtbarkeitsdiagramm dargestellt. Die folgenden Beispiele zeigen die Satellitensichtbarkeit an den vier ausgewählten Positionen Hammerfest (Nordkap), München (Beispiel einer aktuellen Position), Lagos (Äquatornähe) und Kapstadt (Südhälfte) zum Zeitpunkt 25.06.03 (Elevationsmaske = 15° , Fenster von 0 - 24 h, Almanach vom 24.06.03).

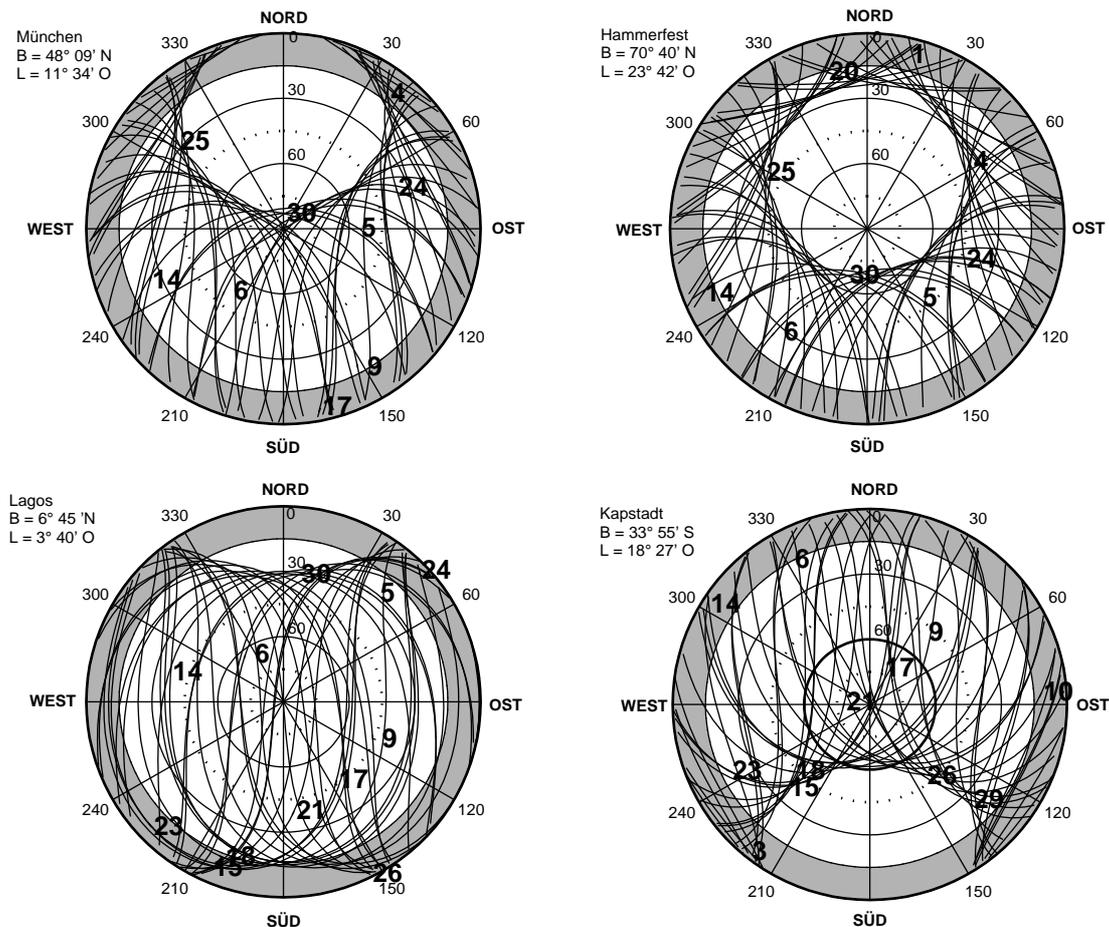


Abbildung 3.15: polares Sichtbarkeitsdiagramm München, Hammerfest, Lagos und Kapstadt

3.2.2 Latenzzeit bei GPS-Beobachtungen

Die jeweilige GPS-Position P_i zur Messepoche i wird hoch präzise im UTC-Zeitrahmen aus der Funktion

$$P(x_i, y_i, z_i) = f(T_{UTC}, \Delta T_i^S, \Delta T^E, R_{E,i}^S) + c_{trop} + c_{iono} \quad (3.12)$$

mit den geometrischen Entfernungen $R_{E,k}^S$ zwischen dem Satellit k und dem Empfänger (Code-, differentiell korrigierte Code- oder Phasenmessungen) berechnet. Werden lediglich die im NMEA-Format berechneten GPS-Positionen in einem Log-File aufgezeichnet und im post-processing weiterverarbeitet und visualisiert, so wirkt sich die Berechnungszeit der Position im Empfänger nicht genauigkeitsmindernd aus. Hingegen verursachen die **Berechnungs-, Verzögerungs- und Ausgabezeiten** systematische Fehler zwischen dem Signalempfang und der Ausgabe der Echtzeitposition. Mit dem unter Kapitel 2 dargestellten Echtzeit-Registrierungssystem kann diese zeitliche Verzögerung zwischen dem PPS-Event und dem Eintreffen des ersten GPS-Datenstrings (beim NMEA-Protokoll ist dies der erste String der **Sentence ID \$**) genau aufgezeichnet werden. Außerdem besteht mit dieser Registrierungssoftware die Möglichkeit, die Anzahl der Schnittstellenabfragen aufzuzeichnen. Die folgende Gesamtübersicht mit einem Beispiel der Aufzeichnung aus PPS-Event, RTK- und DGPS-Daten verdeutlicht diese Vorgehensweise.

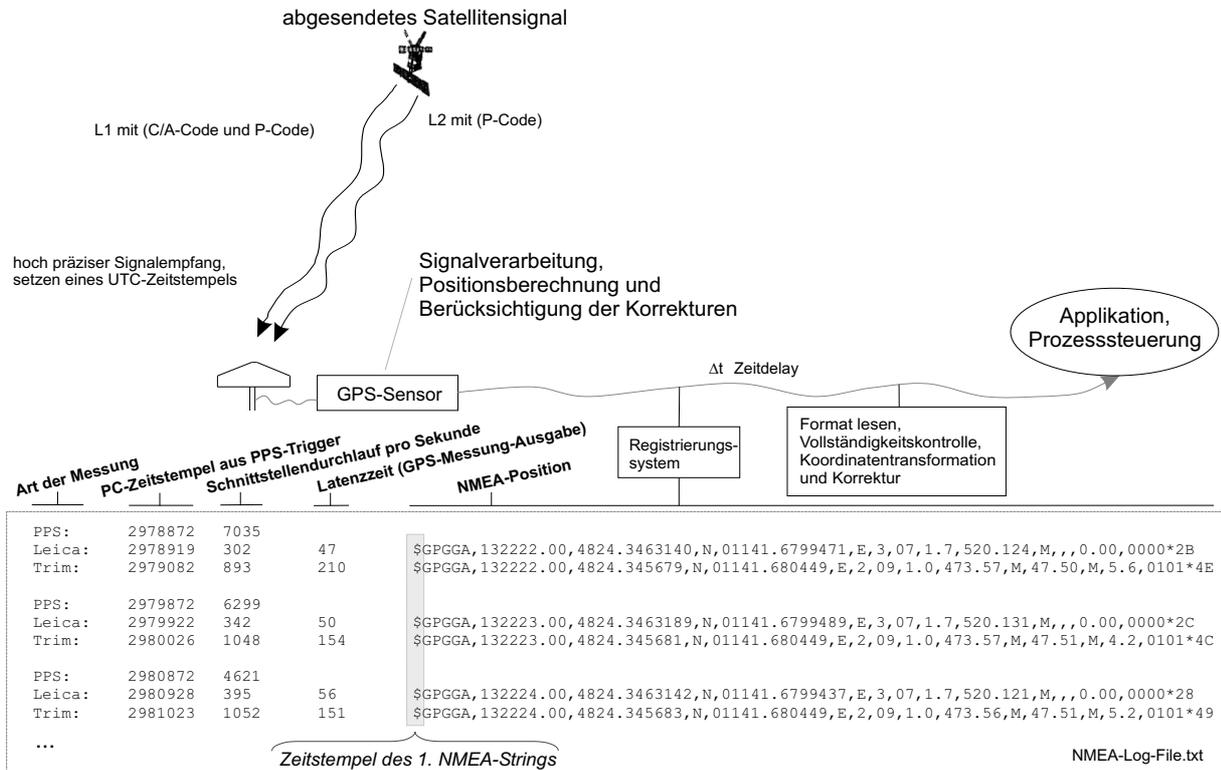


Abbildung 3.16: Latenzzeitbestimmung des Signalempfangs (volle UTC-Epoche und NMEA-Ausgabe)

Somit ergibt sich der Wert der Latenzzeit Δt_{Out}^E aus der im Empfänger berechneten unbekanntem Größe t^E (Zeitpunkt der Signalerfassung im GPS-Empfänger) und dem PPS-Event t_{PPS} . Die mittlere Latenzzeit errechnet sich aus dem Mittelwert aller Aufzeichnungen einer Messreihe über

$$\Delta t_{Out}^E = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n f(t^E, t_{Ber}, \Delta t_T, t_{korr}, t_{Out}) \quad (3.13)$$

mit

- t^E berechnete Empfängeruhrzeit in *UTC*,
- t_{Ber} Dauer der Positionsberechnung in Abhängigkeit der Informationsmenge,
- t_{korrr} Dauer der Korrekturen,
- Δt_T Totzeit und
- t_{Out} Dauer der kompletten Datenausgabe.

Wegen der komplexen Algorithmen und der Sensorzusammensetzung ist die Definition dieser Funktion nicht oder nur bedingt möglich. Δt_{Out}^E und t_{Begin}^{End} (aus der Formel 2.13) ergeben die verfügbaren Zeitmarken der Positionen in *UTC*. Zur Übertragbarkeit der Ergebnisse ist hier auf die entsprechende Konfiguration (Elevationsmaske, Filter, Übertragungsrate, Rohdatenspeicherung bei geodätischen Empfängern, Antennenart, Antennenkabellänge, Messart stand-alone, -DGPS, -RTKGPS, Ausgabeart und -menge) des verwendeten GPS-Empfängers und der Firmwareversion zu achten. Bei der genaueren Betrachtung der verfügbaren NMEA-Positionen in Echtzeit zeigt sich eine weitere Abhängigkeit der Latenzzeit von der Messfrequenz. Die nachfolgenden Abbildungen (3.17 - 3.22) zeigen an ausgewählten Beispielen das Verhalten, die **Homogenität** und das **Rauschen der Latenzzeit** zwischen der Positionsberechnung und der Ausgabe des Datenstrings.

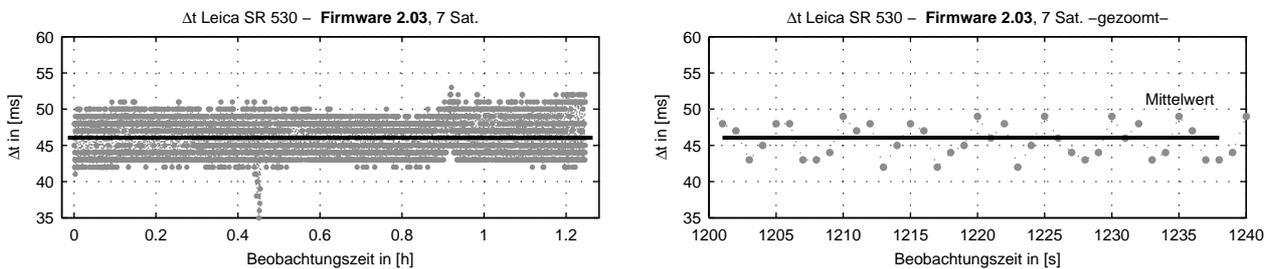


Abbildung 3.17: Verhalten der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 1 Hz)

Die beiden Plots zeigen zum einen, dass die Verzugszeiten am Beispiel des Leica SR530 Empfängers in einem Band von ± 4 ms streuen. Die Standardabweichung beträgt hier 2,5 ms. Zum anderen veranschaulicht der gezoomte Plot-Ausschnitt ein sägezahnähnliches Verhalten der einzelnen Messepochen. Die Frequenz dieser Latenzfunktion beträgt $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{5}$ Hz. Das Verhalten der Latenzfunktion ist nicht von dem Messverfahren (stand-alone, DGPS oder RTKGPS) abhängig. Lediglich der berechnete Mittelwert bei unterschiedlichen Messverfahren (stand-alone und RTKGPS) variiert um einige Millisekunden (vgl. Tab. 3.6). Durch Firmware-updates wird meist die Funktionalität des Berechnungsalgorithmus ohne Hardwaremodifikation (bessere RTK-Leistung, schnellere Mehrdeutigkeitslösung, Multipath-Unterdrückung oder zusätzliche Schnittstellenunterstützung) erweitert. Die Bandbreite nach dem Firmware-update des Leica SR530 von der Version 2.03 auf 3.0 (Boot: 1.61, Measure Engine: 1.39, Measure Engine Boot: 1.03, Navigation: 2.09, Kommunikation: 1.50 und Tastatur/Anzeige: 2.01) erzeugt eine größere Streuung der Signalverarbeitungs-, Positionsrechnungs- und NMEA-Ausgabezeit. Die Hardwarekomponenten- und Messkonfiguration in Abb. (3.18) war identisch zu (Abb. 3.17).

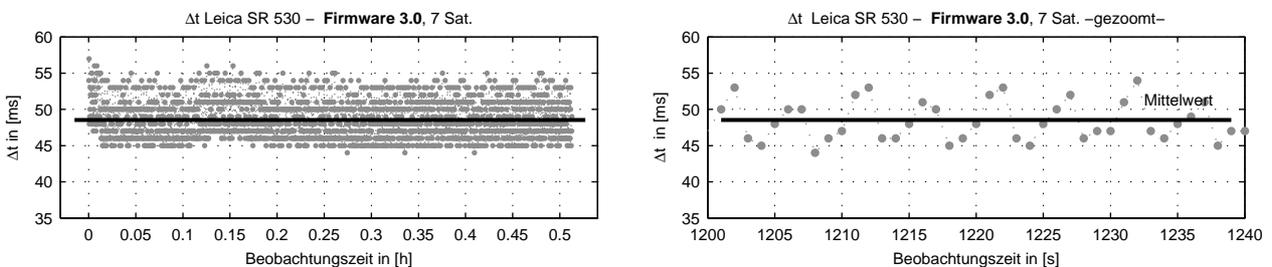


Abbildung 3.18: Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 1 Hz)

Die Verteilungsfunktion der Latenzzeit weist ein sehr ähnliches Verhalten wie bei der Messung mit der alten Firmware auf. Ein Beweis für die Implementierung zusätzlicher Berechnungsalgorithmen in die Firmware 3.0 ist der Anstieg des Latenzzeitmittelwerts vom 46,1 ms auf 48,5 ms. Die beiden Untersuchungen zeigen, dass

es zur exakten Berücksichtigung der Latenzzeit bei Echtzeitanwendungen immer einer neuen Bestimmung von Δt_{Out}^E bei Veränderungen der Software zur Messdatenverarbeitung und Positionsberechnung im GPS-Empfänger (Firmware) bedarf.

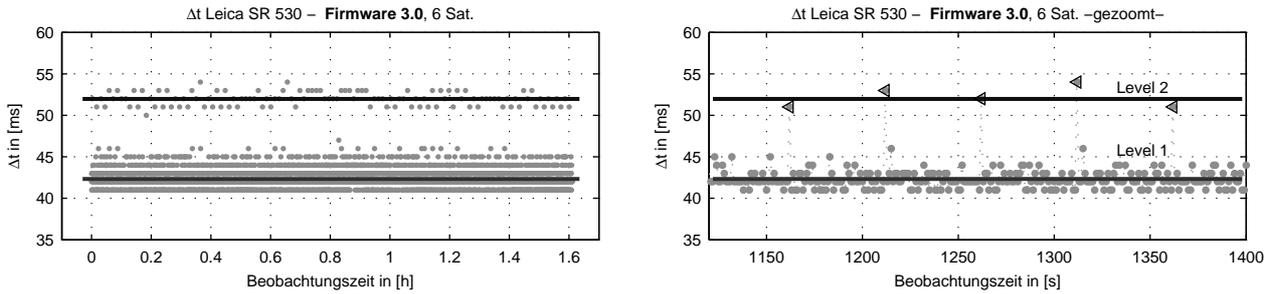


Abbildung 3.19: Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 10 Hz)

Eine weitere Abhängigkeit von Δt_{Out}^E ergibt sich durch die eingestellte Messfrequenz am GPS-Empfänger. Der geringere Wert der Latenzzeit mit der Messfrequenz 10 Hz gegenüber 1 Hz deutet auf ein etwas vereinfachtes Berechnungsverfahren hin. Zur exakten Eliminierung des Echtzeitfehlers müssen hier zwei unterschiedliche Niveaus $\Delta t_{Out,1}^E$ und $\Delta t_{Out,2}^E$ bestimmt und berücksichtigt werden. Genau nach **50 Epochen**, d. h. nach 5,0 Sekunden benötigt der Algorithmus für die nachfolgende Positionsberechnung etwa 9,5 Millisekunden länger. Dies ist bei der Korrektur der Echtzeitpositionen zu berücksichtigen. Wichtig hierbei ist außerdem, dass die Berechnung der echten Epochen (keine interpolierten Positionen) vor dem Beginn des Signalempfangs der nachfolgenden Messepoche $i + 1$ abgeschlossen ist, da der Empfängerprozessor keine Positionen berechnen und zeitgleich neue GPS-Signale verarbeiten kann. Hierbei ist die Bedingung maßgebend

$$\Delta T_{Mess} < \frac{1}{f_{Mess}} \quad (3.14)$$

mit f_{Mess} als Messfrequenz oder ΔT_{Mess} zur Berechnung des Zeitunterschieds zweier aufeinanderfolgender GPS-Messepochen. So müssen z. B. bei 10 Hz die Berechnungen, Korrekturen und die Stringausgabe innerhalb des Zyklus von 100 ms abgeschlossen sein.

Das Rauschen und die Werte der berechneten Latenzzeit hängen jedoch vorrangig von Empfängertyp ab. Bei der Betrachtung der einzelnen Latenzwerte des Trimble AgGPS132 mit OmniSTAR korrigierten DGPS-Positionen liegt die Variation in einem Band von ± 15 ms. Systematische Verteilungen des Zeitrauschens zur Modellierung konnten hier nicht erkannt werden. Auffällig ist außerdem, dass der GPS-Empfänger Trimble AgGPS132 zur identischen Elevationsmaske, Messzeit und -bedingung bis zu 2 Satelliten mehr als der Leica SR530 beobachten kann.

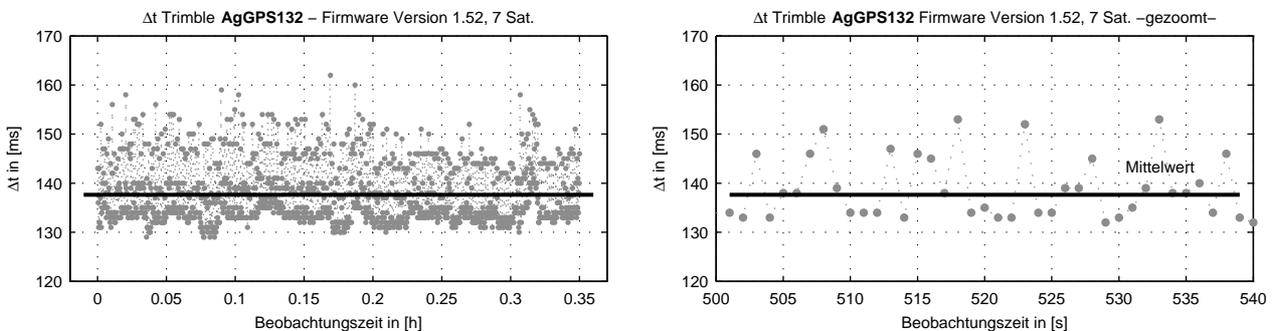


Abbildung 3.20: Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Trimble AgGPS132 (Messfrequenz 1 Hz)

Ziel dieser Untersuchungen war es, den Wert der Latenzzeit bestmöglich zu bestimmen. Beim Vergleich verschiedener Messungen unterschiedlicher Satellitenkonstellationen und unterschiedlicher Aufnahmeorte eines Empfängers variierte die Messunsicherheit des jeweiligen Mittelwerts unterhalb 1 ms (Bestimmbarkeit von $\Delta t_{Out}^E < 1$

ms). Dieses Ergebnis ist Vergleichbar mit der Messunsicherheit des Registrierungssystems. Das Rauschen von Δt_{Out}^E einer Beobachtungsreihe liegt je nach Empfänger und Messkonfiguration zwischen wenigen Millisekunden bis etwa ± 15 ms.

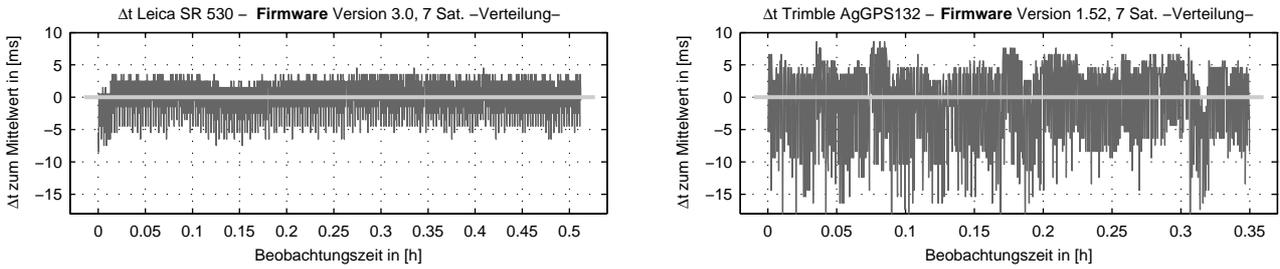


Abbildung 3.21: Verteilung der Latenzzeit Δt_{Out}^E gleicher Beobachtungen mit unterschiedlichen GPS-Empfängern

Als wesentliches Ergebnis konnte des Weiteren der Zusammenhang der Latenzzeit zur beobachteten Satellitenanzahl und somit auch indirekt zum DOP-Wert (Dilution of Precision, Darstellung des Zusammenhangs der einzelnen DOP-Werte zur Positionsgenauigkeit der Navigationslösung z. B. unter [WUNDERLICH, 1993]) hergestellt werden. Die beiden folgenden Plots von Δt_{Out}^E zur Satellitenanzahl belegen dies. Trackt der Empfänger einen Satelliten mehr oder verliert er das Signal, so ändert sich folglich die Anzahl der Beobachtungsgleichungen, d. h. die Größe der Matrix während der Ausgleichung im GPS-Empfänger. Dieser Zustand wirkt sich direkt auf Δt_{Out}^E aus. So kann der Zusammenhang dieser einzelnen Werte mit

$$\Delta t_{Out}^E = a \cdot (\text{Sat.} - \text{Anzahl}) + b = c \cdot (N)DOP + b \tag{3.15}$$

aus den unterschiedlichen Koeffizienten für a, b, c und N für die einzelnen DOP-Werte (G-, P-, H-, V-, T- und HTDOP) formuliert werden. Der Plot der Satellitenanzahl deckt sich mit den jeweiligen Mittelwerten.

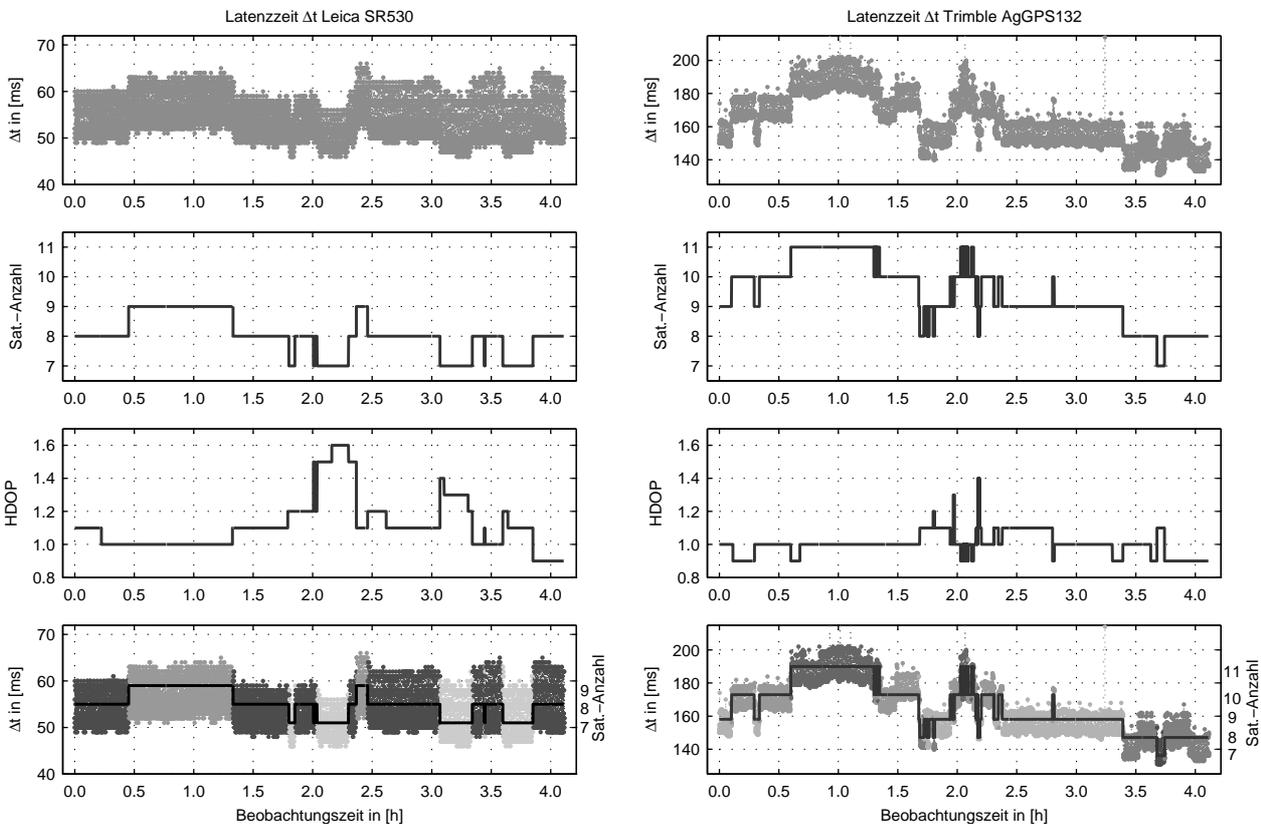


Abbildung 3.22: identische Beobachtungen zur Bestimmung der Latenzzeit Δt_{Out}^E in Abhängigkeit der Satellitenanzahl

Aus diesem Zusammenhang lassen sich die entsprechenden Latenzwerte für einen Empfängertyp zusammenstellen. Die mit der Messfrequenz von 1 Hz aufgezeichneten Positionen des Trimble AgGPS132 (Firmware V1.52) benötigten bei der entsprechenden Konfiguration (siehe Tab. 3.5) über 170 ms für die Positionsausgabe. Des Weiteren müssen die Stringlänge und die Übertragungsrate durch eine zusätzliche konstante Verzögerungszeit Δt_{End}^{Data} (vgl. Abb. 2.13; 9600 Baud = 60,833 ms, 19200 Baud = 30,422 ms, etc.) bis zur vollständigen Übertragung und Verfügbarkeit der Zeile, d. h. dem Wert der „checksum“ des NMEA-Protokolls berücksichtigt werden. Idealerweise ist die Übertragungsrate des GPS-Empfängers und der Registrierungseinheit hoch einzustellen. Die Übersicht der einzelnen Latenzzeiten Δt_{Out}^E der untersuchten GPS-Empfänger wird in den beiden folgenden Tabellen inkl. der inneren Genauigkeit (rms) gegenübergestellt.

Satellitenanzahl	Mode 1, rms in [ms]	Mode 2, rms in [ms]	Mode 3, rms in [ms]	Mode 4, rms in [ms]
4	103,7 [±6,6]	95,7 [±6,9]	92,0 [±7,1]	99,9 [±6,8]
5	113,8 [±6,8]	106,8 [±6,7]	100,5 [±6,6]	108,9 [±6,8]
6	122,2 [±6,9]	113,5 [±7,2]	108,7 [±6,8]	117,4 [±6,5]
7	134,4 [±7,2]	124,2 [±6,8]	119,2 [±6,5]	128,7 [±7,2]
8	143,3 [±6,5]	133,1 [±6,6]	129,8 [±7,2]	139,7 [±6,8]
9	155,8 [±6,8]	145,7 [±6,9]	141,9 [±6,7]	151,6 [±6,7]
10	171,4 [±6,8]	158,5 [±7,0]	158,4 [±6,6]	163,4 [±6,4]

Tabelle 3.5: Ergebnis der Latenzzeitbestimmung des Trimble AgGPS132 mit OmniSTAR DGPS

mit der Konfiguration

- Mode 1 = **DGPS** mit PV-Filter, Firmware V1.52
- Mode 2 = **GPS** mit PV-Filter, Firmware V1.52 (OmniSTAR)
- Mode 3 = **GPS** ohne PV-Filter, Firmware V1.52
- Mode 4 = **DGPS** ohne PV-Filter, Firmware V1.52 (OmniSTAR)

Analog dazu die Ergebnisse mit dem Leica Empfänger SR530 (Messfrequenz 1 Hz, Ausgabeoption „sofort“).

Satellitenanzahl	RTK , Firmware V2.03 in [ms], rms	stand-alone , Firmware V3.0 in [ms], rms	RTK , Firmware V3.0 in [ms], rms
4	38,0 [±3,1]	40,1 [±3,2]	41,1 [±3,0]
5	40,5 [±2,6]	42,0 [±3,3]	43,6 [±3,3]
6	43,3 [±2,7]	43,1 [±2,9]	46,0 [±3,3]
7	46,1 [±3,0]	43,2 [±2,8]	48,6 [±2,7]
8	48,3 [±3,2]	46,7 [±3,4]	51,3 [±2,8]
9	50,9 [±2,9]	49,7 [±3,0]	54,6 [±3,3]

Tabelle 3.6: Ergebnis der Latenzzeitbestimmung Δt_{Out}^E des Leica SR530 GPS-Empfängers

Aus der Gleichung (3.15) folgt die grafische Darstellung von Δt_{Out}^E für unterschiedliche Messungen mit dem Leica SR530 und dem Trimble AgGPS132.

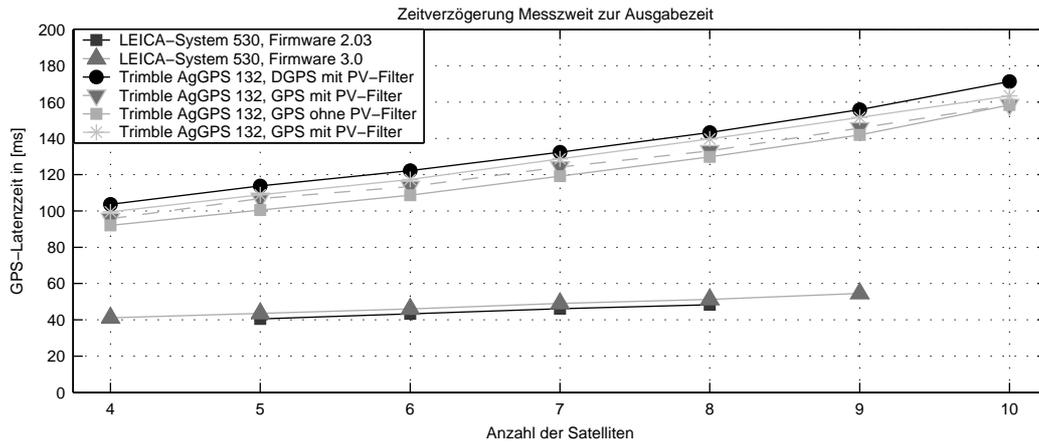


Abbildung 3.23: grafische Darstellung der einzelnen Latenzzeiten Δt_{Out}^E

Die Ausgabeoption „**sofort**“ wird in der technischen Referenz beschrieben als „NMEA-Ausgabe sobald die Positionen zur Verfügung stehen“. Als weitere Einstellmöglichkeit kann am Leica SR530 die Option „**volle Epoche**“ eingestellt werden. Gemäß der Leica GPS-Manuals wird hierbei das NMEA-Protokoll exakt und kontrolliert zur vollen Messepoche UTC über den Port ausgegeben. In Wirklichkeit verringert sich zwar mit dieser Ausgabeoption der Betrag der Latenzzeit (vgl. Abb. 3.24 links), jedoch ist ein größerer Bereich des Rauschens von Δt_{Out}^E vorhanden (vgl. Abb. 3.24 rechts). Die Verwendung eines weniger rechenintensiven Algorithmus mit größeren Unsicherheiten und eingeschränkter Funktionalität wird hierbei vermutet.

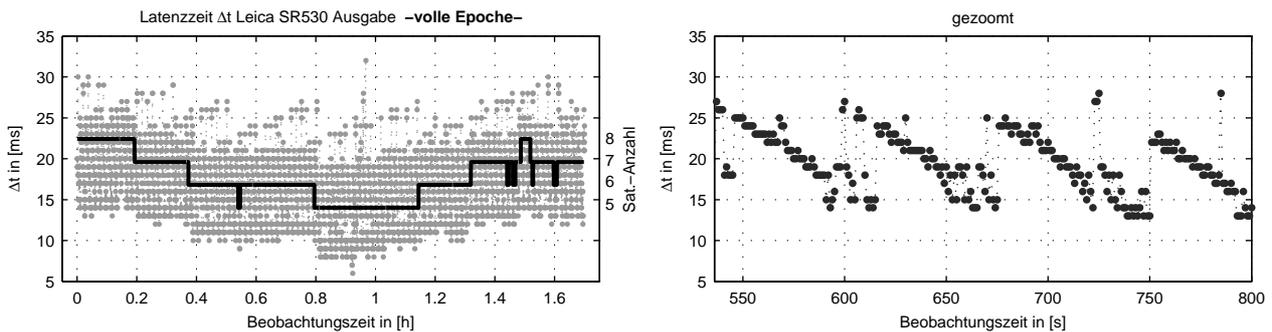


Abbildung 3.24: Latenzzeit Δt_{Out}^E Leica SR530 Ausgabeoption - „volle Epoche“ -

Eine Modellierung von Δt_{Out}^E ist hier nur bedingt möglich, da die Bestimmung des Wertes nicht mit der Anforderung weniger Millisekunden erfüllt werden kann. Das wiederum sägezahnähnliche Verhalten von Δt_{Out}^E , mit homogenen Ausreißern, kann hier nicht mit der Latenzzeit als Mittelwert eliminiert werden. Das Rauschen steigt bei dieser Konfiguration auf über ± 15 ms an. Eine geringe Korrelation zwischen der Latenzzeit und der Satellitenanzahl ist jedoch auch hier erkennbar. Bei Echtzeitanwendung mit diesem Gerät wird empfohlen, stets nur die Position mit der Ausgabeoption *sofort* zu verwenden.

Die in der Abbildung (3.25) dargestellten Untersuchungen an dem hand-held-Empfänger Garmin eTrex ergaben keinen direkten Zusammenhang zwischen der Latenzzeit und der Anzahl der beobachteten Satelliten. Die Berechnungszeit liegt zwar in einem sehr kurzen Zeitintervall (wenig Funktionalität), jedoch ist auch hier eine Modellierung nur näherungsweise mit einem allgemeinen Mittelwert von 30 ms (Mittelwert bei DGPS mit ALF 28,1 ms und 29,3 ms bei OmniSTAR) möglich.

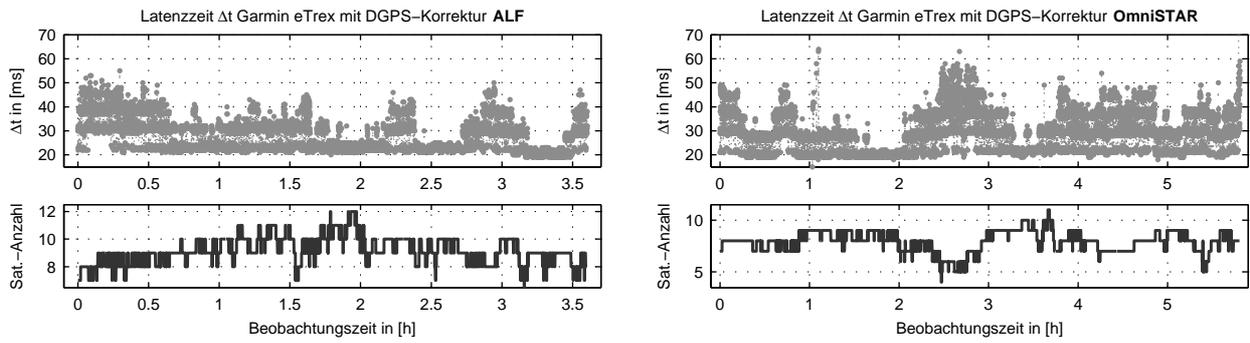


Abbildung 3.25: Latenzzeit Δt_{Out}^E Garmin eTrex mit Pseudorange-korrigierten Strecken

Wird bei geodätischen GPS-Empfängern zusätzlich zur NMEA-Ausgabe eine Rohdatenspeicherung (z. B. auf die interne PCMCIA-Karte) durchgeführt, so steigt die Latenzzeit auf ein Vielfaches an. Zur Berechnung von Δt nach der Formel (3.13) muss die Dauer des Schreibvorgangs auf das austauschbare Speichermedium addiert werden. Eine Abhängigkeit von Δt_{Out}^E zur Satellitenanzahl ist auch hier nicht mehr gegeben. Dies zeigt der Plot von Δt_{Out}^E bezogen auf die Satellitenanzahl (Abb. 3.26). Bei der Korrektur müssen mit dieser Messkonfiguration wiederum zwei unterschiedliche Korrekturniveaus berücksichtigt werden.

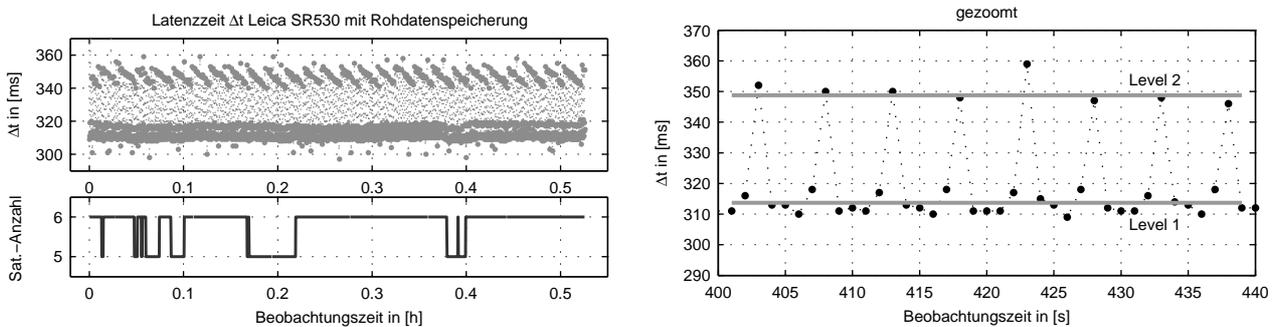


Abbildung 3.26: Latenzzeit Δt_{Out}^E mit Rohdatenspeicherung des Leica SR530 in Abhängigkeit der Satellitenanzahl

Die im Hinblick auf die echtzeitfähige Positionsangabe untersuchten GPS-Empfänger belegen, dass die verschiedenen Typen in Abhängigkeit der Messkonfiguration unterschiedliche Verhaltensweisen und Beträge von $\Delta t_{Out,i}^E$ aufweisen. Wegen der sehr häufigen Firmwaremodifikationen müssen diese Arbeiten immer wieder neu durchgeführt werden. Zusammenfassend sind bei der Bestimmung der Latenzzeit von GPS-Echtzeitanwendungen folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Gewährleistung der Registrierungseinheit im Genauigkeitsbereich von etwa 1 ms,
- Analyse von $\Delta t_{Out,i}^E$,
- Überprüfung der Homogenität und der Ausreißer (Mittelbildung - **Niveau 1 / Niveau 2**),
- Bestimmung der Standardabweichung (innere Genauigkeit von Δt_{Out}^E),
- Darstellung der Latenzzeit in Abhängigkeit der Satellitenanzahl und
- Interpretation der Ergebnisse in Abhängigkeit des Sensortyps und der -komponenten (z. B. Antennenkabellänge), der NMEA-Sentences, der Sensorkonfiguration, der Ausgabeoption, des kinematischen Positionsfilters, der Datenspeicherung und der Messfrequenz.

3.3 Genauigkeitsuntersuchungen kinematischer GPS-Beobachtungen

Unabhängig von der Anwendung und dem verwendeten Instrumentarium werden in der Ingenieurgeodäsie neben den Messergebnissen die Messunsicherheiten meist als **empirische Standardabweichungen** s angegeben [HEISTER, 2001]. Der Näherungs- oder Schätzwert s berechnet sich durch den Ansatz

$$s = \sqrt{\frac{\sum (\hat{x} - x_i)^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum vv_i}{n-1}} \quad (3.16)$$

aus der Anzahl der Beobachtungen n , den unbekanntem Sollwert \hat{x} und den im Messpunkt x_i in Relation zum Mittelwert \hat{x} verbleibenden Fehlern. In der Vergangenheit wurde s häufig mit dem Begriff mittlerer Fehler bezeichnet. Die bereits verwendete Bezeichnung rms (Root-Mean-Square) bzw. die theoretische Standardabweichung σ ergibt sich aus der Differenz $\epsilon = \xi_{wahr} - x_i$ (wahrer Wert - Beobachtung der Messepoche i) aus

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (\epsilon)^2}{n}}. \quad (3.17)$$

Wenn keine Sollinformationen gegeben sind, so wird häufig der wahre Wert mit dem arithmetischen Mittel aus allen Beobachtungen verwechselt. Hierbei muss neben dem Bestimmungsverfahren des beobachteten Mittelwerts stets der Zusatz Standardabweichung zum Mittelwert verwendet werden. Üblicherweise werden die Genauigkeitsangaben mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $1\sigma = 68,3\%$ angegeben.

Bei der Diskussion kinematischer GPS-Positionsgenauigkeiten ist es zunächst immer sinnvoll, die weniger aufwändigen Genauigkeitsuntersuchungen im statischen Bereich zu betrachten. Das „Institute of Navigation“ beschreibt im „**ION STD 101 Recommended Test Procedures for GPS Receivers Revision C 27 January 1997**“ einen internationalen Standard für statische GPS-Genauigkeitsuntersuchungen (vgl. Absatz 1.3, Static Navigation Accuracy). Hierin wird die Verwendung der Sollinformation vorausgesetzt. Zur Genauigkeit der Referenzinformation im WGS84-System wird im ION STD 101 Standard lediglich die Angabe

$$Faktor = \frac{\sigma(Ref. - System)}{\sigma(Messsensor)} = minimal \quad (3.18)$$

formuliert. Bei der Verwendung der Referenzstation muss auf die Beziehung des RTK-Bezugsrahmens (z. B. European Terrestrial Reference System 1989, ETRS89) und des Anschlusses der Pseudorange-Korrekturinformation geachtet werden. Bei dem Vergleich von RTK zu DGPS (Phasenlösungen zu differentiellen Codemessungen) ergibt sich aus den Untersuchungen (Abb. 3.11 und Abb. 3.29, wobei hier die RTK-Beobachtung die Referenz angibt) mit dem Ansatz des ION STD 101 Standard ein Faktor von 0,017 aus $\frac{0,02 \text{ m}}{1,19 \text{ m}}$. Aussagekräftiger ist jedoch die Betrachtung der einzelnen Ablagevektoren für jede Messepoche i . Idealerweise errechnet sich der einzelne 3-D-Ablagevektor $\Delta \vec{v}_{i(RTK-DGPS)}^{3-D}$ (entspricht der Bezeichnung $\Delta PPRE$ aus dem ION STD 101 Standard) mit

$$\Delta \vec{v}_{i(RTK-DGPS)}^{3-D} = \sqrt{(X_{i,RTK} - X_{i,DGPS})^2 + (Y_{i,RTK} - Y_{i,DGPS})^2 + (Z_{i,RTK} - Z_{i,DGPS})^2}. \quad (3.19)$$

Analog zur Formel (3.19) ergibt sich die Lagedifferenz $\Delta \vec{v}_k^{2-D}$ (gleich $\Delta UPRE$) oder die Höhendifferenz $\Delta \vec{v}_k^H$ (gleich $\Delta HPRE$) mit k als Index für den Ansatz *Ref.-System - Messsensor* der Epoche i . Die Position P_i aus den RTK-Messungen stellt in der Praxis einen dem **wahren Wert** sehr nahen Sollwert im Bereich von wenigen Zentimetern dar. In der Abbildung (3.27 a) kann so der Ablagevektor jeder Epoche i in der Lage- (Längs-, Querdifferenz) und Höhenkomponente zur Referenzkoordinate bestimmt werden. Die RTKGPS-Antenne kann jedoch nicht an der selben Stelle wie die GPS-Antenne des Prüflings montiert werden. So kann dieses Verfahren nur als Näherungsuntersuchung betrachtet werden. Außerdem ist eine gegenseitige Störung der GPS-Antennen bei sehr kurzen Abständen (wenige Dezimeter) zu erwarten (vgl. ION STD 101 Standard Empfehlung oder [GÖRRES, 2001]).

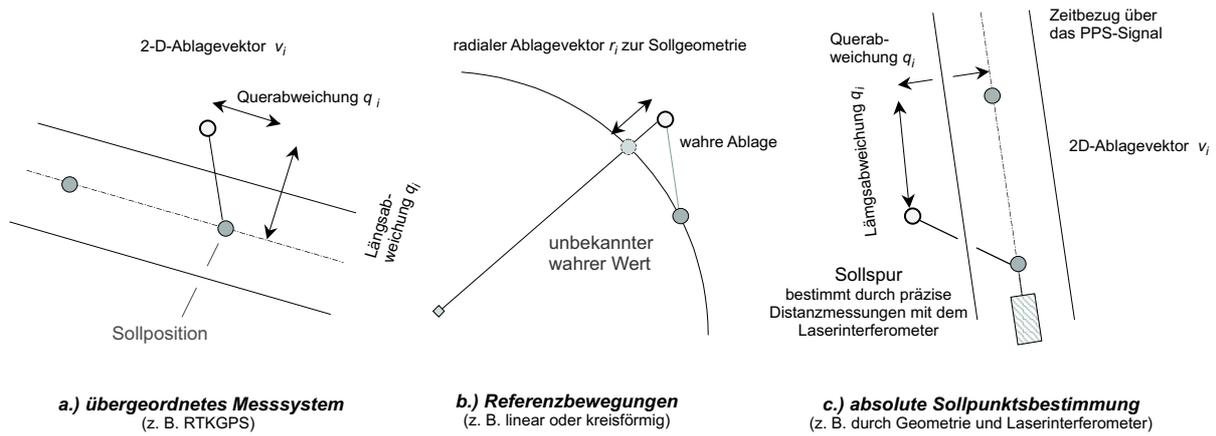


Abbildung 3.27: Untersuchungsarten kinematischer Genauigkeitsbetrachtung bei GPS

Eine weitere Untersuchungsmöglichkeit bietet die Verwendung einer geometrisch bekannten Referenzbahn. Hier wurden mit einem Kreissimulator (einfache geometrische Bestimmung durch den Mittelpunkt und Radius) sehr gute Ergebnisse erzielt. Eine Bestimmung des wahren Sollwerts kann nicht erfolgen. Mit dieser Methode wird nur der radiale Ablagevektor zur Sollspur bestimmt (vgl. Abb. 3.27 b). Die Abweichung entlang der Bewegungsspur ist unbekannt. Bei homogenen Bewegungen können lediglich die relativen Abstände zwischen den einzelnen Beobachtungen in die Auswertung eingeführt werden. Die Ergebnisse der radialen Lageabweichungen weisen somit als Mittel einen um etwa den Faktor $\sqrt{2}$ verringerten Fehler auf (siehe Abb. 5.5). In den beiden Abbildungen (3.3 und 3.11) wurde bereits eine Messreihe an einem kreisförmigen Bewegungssimulator dargestellt. Aufbauend kann in (Abb. 3.27 c) mithilfe eines Laserinterferometers eine hoch präzise Sollpunktbestimmung an einem linearen Bewegungssimulator erzeugt werden. Durch das Auslösen der Entfernungsmessung am Laserinterferometer durch das PPS-Signal werden Sollpunkte nahe am wahren Wert im *UTC*-Zeitrahmen erzeugt.

Eine elegante Methode einer Bestimmung von DGPS-Positionsablagen stellt die Anordnung von Abbildung (3.28 links) dar. Durch die Verwendung von zwei Roverantennen kann die Sollposition geometrisch exakt berechnet werden (Beispiel einer Untersuchungsreihe des *GEOTEC*-Systems, <http://www.geo-tec.de/geo-tec/index.htm>).

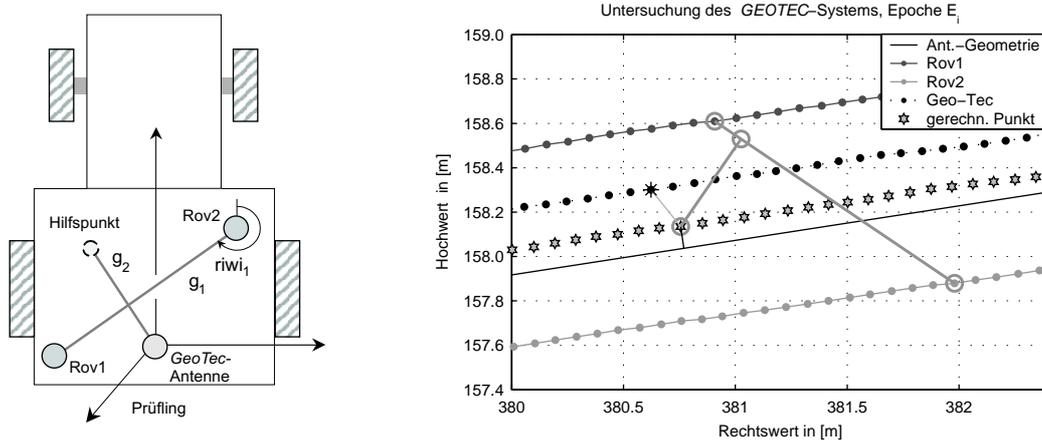


Abbildung 3.28: DGPS Positionsuntersuchungen während einer landwirtschaftlichen Applikation

Zunächst können die Gerade g_1 und der Richtungswinkel $riwi_1$ aus den beiden Punkten P_{Rov1} und P_{Rov2} z. B. durch statische Tachymetermessungen in einem lokalen Koordinatensystem bestimmt werden. Die Gerade g_2 ergibt sich folglich aus der geometrischen Anordnung der drei gemessenen Punkte Rov1, Rov2 und GeoTec-Antenne und einer 2-D-Ähnlichkeitstransformation mit zwei identischen Punkten. Des Weiteren kann über Richtungswinkel $riwi_1 \pm 100$ gon (abhängig von der Fahrtrichtung) und einen Hilfspunkt durch polares Absetzen der Sollpunkte eindeutig aus der Verschneidung $g_1 \cap g_2$ ermittelt werden. Die Sollhöhe ergibt sich aus der linearen Interpolation. Eine Vereinfachung der Sollpunktbestimmung durch die Anordnung der drei

GPS-Antennen in einer Linie ist meist auf dem Dach der mobilen Arbeitsmaschinen nicht zu realisieren. Mit diesem Verfahren kann der Interferenzeinfluss von GPS-Antennen mit geringem Abstand (vgl. ION STD 101 Radio Frequency Interference) eliminiert werden. Eine dritte RTK-Roverantenne würde zusätzlich eine absolute Bestimmung der Längs- und Querneigungen in Fahrtrichtung oder bezogen auf die Orientierung des Koordinatensystems erlauben. Mit einer Antennenanordnung wie in Abbildung (3.28) können diese Unbekannten (wichtig zur Reduzierung der GPS-Position auf den Maschinenfußpunkt) nur aus der Bewegungsrichtung und mehreren Messepochen der Trajektorie abgeleitet werden. In der Abbildung (3.28, rechts) wird die Untersuchung bzgl. der Positionsgenauigkeit eines autonom-gesteuerten Traktors (RTKGPS mittels INS und Neigungssensoren zusätzlich korrigiert) entlang einer vorgegebenen Solltrasse mit der RTKGPS-Referenz dargestellt. Natürlich können die präzisen Sollinformationen auch mit einem zielverfolgenden Servotachymeter (Beachtung des Offsets zwischen dem APZ und dem Prismenzentrum) erzeugt werden.

Mit der aufgeführten Auswertetechnologie (RTK-Referenz mit zwei Roverantennen und gerechneten Sollpositionen) zur kinematischen Genauigkeitsuntersuchung wurden verschiedene Arbeiten und Applikationen landwirtschaftlicher Bodenbearbeitung untersucht. Die nachfolgenden Darstellungen (Abb. 3.29 und Tab. 3.7) der Lage- und Höhenablagevektoren in Bezug zum HDOP und der Satellitenanzahl sowie die resultierenden Genauigkeitsmaße stellen eine Beobachtungsreihe während des Pflügens mit dem Trimble AgGPS132 dar.

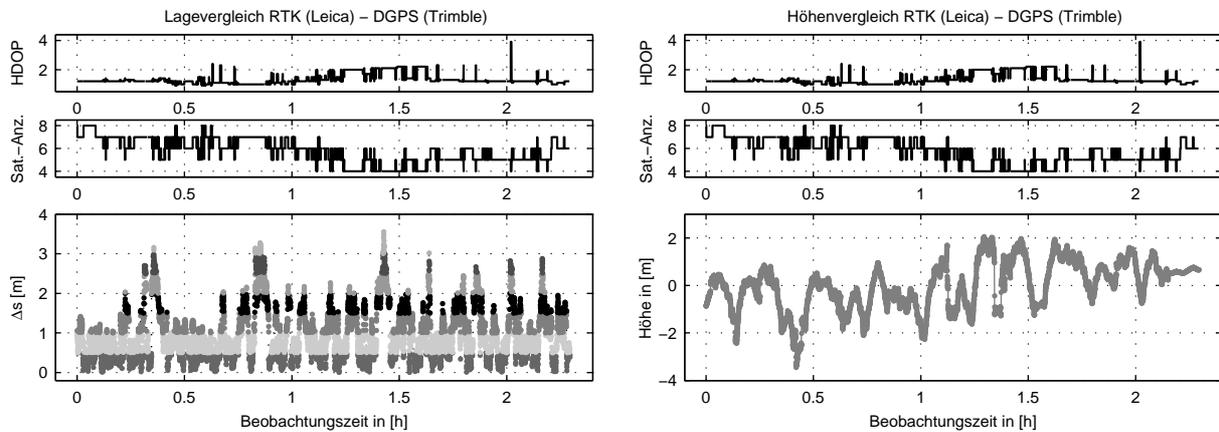


Abbildung 3.29: kinematische Genauigkeitsuntersuchung des Trimble AgGPS132 GPS-Empfängers (0,5 m Abstufung)

ACCY-MEAS	68,3 % (1σ) in [m]	95,4 % (2σ) in [m]	99,7 % (3σ) in [m]	100: Max in [m]	0: Min in [m]	NAV-3-D	DGPS
Δ_{HPRE}	2,07	3,03	3,72	4,03	0,00	3-D	Y
Δ_{UPRE}	1,20	2,28	3,13	3,55	0,00	3-D	Y
Δ_{PPRE}	1,43	2,42	3,32	3,56	0,03	3-D	Y

Tabelle 3.7: Genauigkeitsmaß zur Abb. (3.29), Terminologie aus dem ION STD 101 Standard

Im Gegensatz zur Latenzzeit besteht hier keine direkte Korrelation zwischen der Positionsgenauigkeit und der Satellitenanzahl bzw. -geometrie. Da im NMEA-Protokoll keine Informationen zur Qualität der Position integriert sind, wäre ein solcher Indikator (gegenwärtig aus den NMEA-Informationen nicht berechenbar) für kinematische Echtzeitanwendungen sehr hilfreich. Viele Untersuchungen kinematischer Beobachtungen wurden hinsichtlich der stand-alone, DGPS- und RTKGPS-Korrelation zur Satellitenanzahl durchgeführt. Ein direkter Zusammenhang konnte jedoch nicht festgestellt werden. D. h. eine größere Satellitenanzahl und eine bessere Satellitengeometrie bewirken bei kinematischen GPS-Messungen nicht zwangsläufig eine genauere DGPS-Position. Diese Aussage bezogen auf Echtzeitanwendungen widerspricht vielen Thesen, die davon ausgehen, dass die Genauigkeit der GPS-Position direkt aus den DOP-Werten abgeleitet werden kann. Somit nützt dem Anwender auf der Maschine eine Anzeige der aktuellen Satellitenkonstellation als grobe Orientierung zur Positionsqualität nichts. Weitere Tests wurden hinsichtlich der Verteilung des Kurzzeitrauschens durchgeführt. Z. B. wäre man in Bereichen des Precision Farming in der Lage, verschiedene Applikationen der Bodenbearbeitung durch Spurführungssysteme mit einer relativen Genauigkeit von einigen Dezimetern innerhalb der Bearbeitungszeit

einer Fahrgassenlänge zu realisieren. Der Betrag und die Richtung sowie die Höhenkomponente variieren bei dem untersuchten Sensor jedoch innerhalb weniger Sekunden im erheblichen Maße. Eine systematische Verteilung konnte nicht abgeleitet werden. Die beiden Lageplots (Abb. 3.30) der Ablageverteilung illustrieren dies.

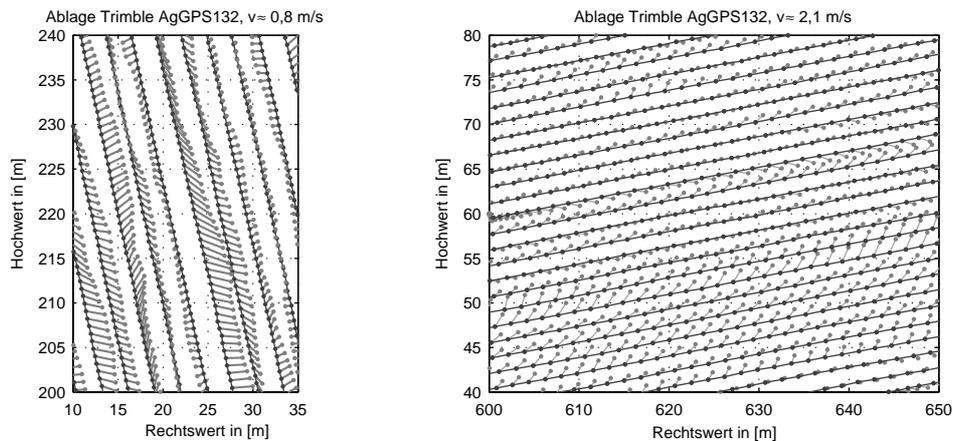


Abbildung 3.30: kinematisches Positionsrauschen während der landw. Bodenbearbeitung (Messfrequenz 1 Hz)

Je nach Anwendung stellt die Höheninformation eine untergeordnete (z. B. bei der autonomen Fahrzeugführung) oder eine zentrale (z. B. bei der Modellierung der Geländeform) Bedeutung dar. Die Pseudorange-korrigierten DGPS-Positionen lassen jedoch wegen der Konfiguration der Satellitenbahnen nur eine begrenzte Aussage bezüglich der Geländeform zu. Die nachfolgenden vier Grafiken veranschaulichen dies. Ein weiteres Problem ist mit der Visualisierung von 3-D Positionsinformationen verbunden. Hier wurde der *ViewPoint* bestmöglich der räumlichen Bewegungsspur angepasst.

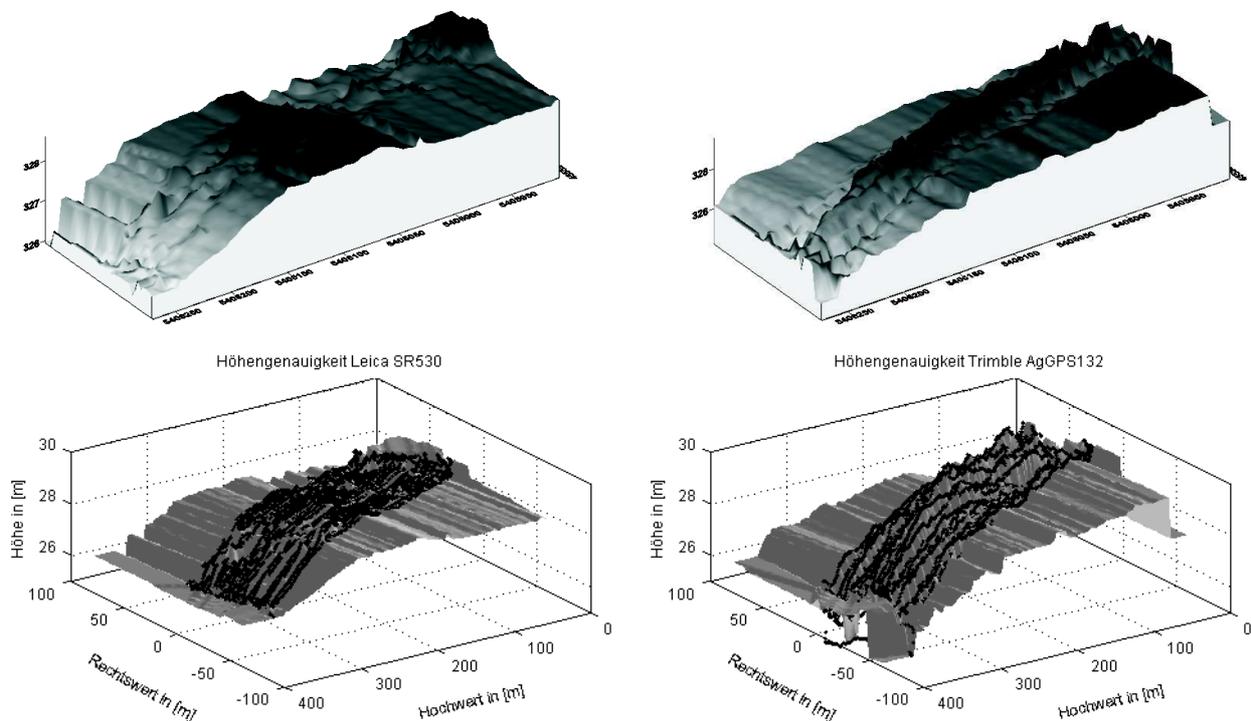


Abbildung 3.31: GPS-Höhengenaugigkeit *kinematisch* (unterschiedliche Darstellungsformen)

Zur strategischen Untersuchung der Leistungsfähigkeit von GPS-Empfängern für kinematische Anwendungen ist es sinnvoll, einen fest definierten Prüfkatalog zu durchlaufen. Die Charakterisierung der relevanten Parameter lässt eine gezielte Auswahl der Messsensoren für die jeweilige kinematische Messaufgabe zu. Dadurch ist auch eine umfassende Vergleichbarkeit der verschiedenen GPS-Empfänger zueinander gegeben. Alle aufgeführten

Prüfkriterien sind bei geodätischen Empfängern auf stand-alone, DGPS- und RTKGPS-Verfahren gesondert anzuwenden. Zur Darstellung der Ergebnisse sollte idealerweise die Terminologie des ION STD 101 Standards verwendet werden.

1. Phase - Statische Untersuchung

- **Initialisierungsverhalten** (Position und Dauer von Init TTFF und Warm TTFF, vgl. Abb. 3.32),
- Bestimmung der **relativen und absoluten Positionsgenauigkeit** „Static Navigation Accuracy“ nach Betrag, Größe und Verhalten (der Untersuchungszeitraum sollte in mehrere 12 h Zyklen aufgeteilt werden),
- **Antennenkalibrierung** nach dem IGS-Standard (Labor- oder Feldkalibrierung),
- Untersuchung des Einflusses der **Antennenkabelänge**,
- Prüfung der **implementierten Positionsfilter** (Land, Wasser und Luft),
- **Satellitenempfang, Signaldetektierung und -stärke**,
- Untersuchung der Auswirkungen simulierter **Abschattungen und Multipatheffekte**,
- Untersuchung von **Zusatzstörungen** (Mobilfunk, Stromleitungen, Radio Frequency Interference),
- Untersuchung der **Qualität von Echtzeitpositionen** (NMEA) zu post-processed berechneten Positionen und
- **Vergleichbarkeit** identischer Empfänger.

Das Initialisierungsverhalten wurde am Beispiel des Trimble AgGPS132 durchgeführt. Nach etwa 15 bis 20 Sekunden (Init TTFF) ist der Empfänger in der Lage eine DGPS-Position auszugeben. Obwohl sich die Satellitengeometrie nach einem weiteren Init TTFF nur minimal innerhalb weniger Sekunden geändert hat, berechnet der Algorithmus eine komplett andere Position (siehe Lage- und Höhenplot Abb. 3.32). Die Variation der Init TTFF liegt jedoch stets innerhalb des Genauigkeitsbereichs der Messanordnung (hier stand-alone, d. h. etwa 10 - 15 m).

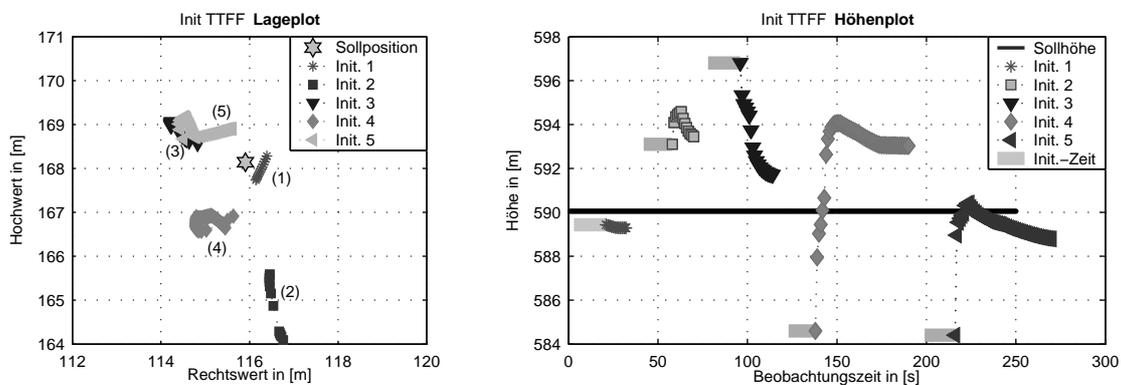


Abbildung 3.32: Untersuchung der Initialisierung (Init TTFF - Warm TTFF), Trimble AgGPS132-Empfänger

In der Terminologie des ION STD 101 Standards ergeben sich für diese Testreihe folgende Werte:

Mean TTFF in	Min TTFF	Max TTFF	Sample Dev/Size	Nav-Mode	DGPS
12,1 m	9,6 m	16,2 m	2,1 m	3-D	Y

Tabelle 3.8: Init TTFF der vorhergehenden Untersuchungsreihe

Außerdem wurde in dieser Untersuchungsreihe das Verhalten von zwei identischen Leica SR530 Empfängern mit einer GPS-Antenne über einen Antennensplitter untersucht. Das detektierte Signal muss bei beiden Empfängern gleich sein. Der Messbeginn lag innerhalb einer Sekunde. In den folgenden beiden Abbildungen (3.33) ist der annähernd identische Zusammenhang dargestellt, der sich aus den berechneten Positionen der beiden Empfängern ergibt.

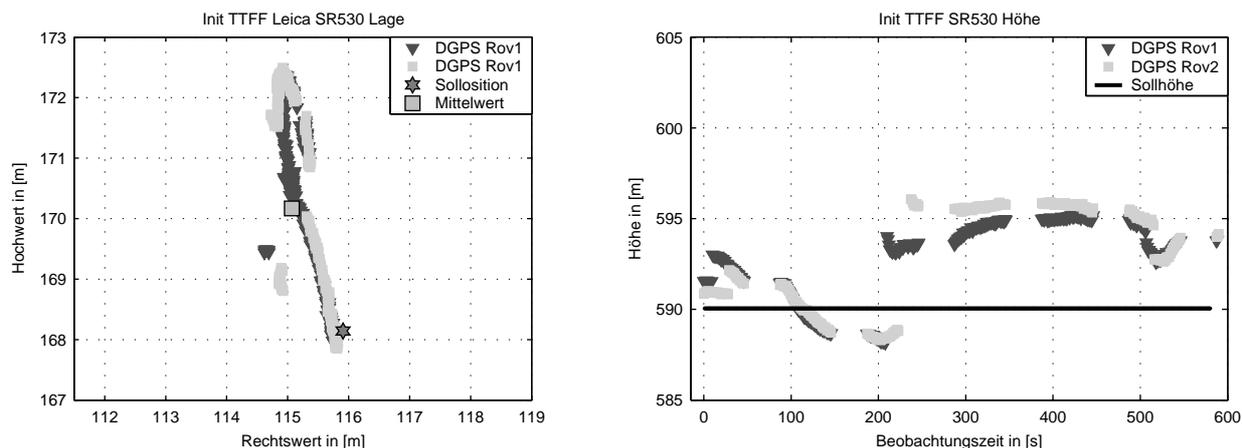


Abbildung 3.33: Untersuchung der Initialisierung von zwei SR530 Empfängern mit einer gemeinsamen Antenne

Analog dazu wieder die Genauigkeitsangaben:

Mean TTF	Min TTF	Max TTF	Sample Dev/Size	Nav-Mode	DGPS
18,3 m	14,7 m	23,8 m	2,6 m	3-D	N

Tabelle 3.9: Init TTF der vorhergehenden Untersuchungsreihe

Aufbauend auf die statischen Untersuchungen ist der Messsensor für kinematische Anwendungen nach folgenden Kriterien zu untersuchen:

2. Phase - Kinematische Untersuchung

- Untersuchungen der **radialen Ablagevektoren** zu einer bekannten Solltrajektorie (Angabe der Führungsgenauigkeit und Wiederholbarkeit),
- Bestimmung des **Messrauschens** in Lage und Höhe mit einem übergeordneten Referenzmesssystem,
- Untersuchung der verschiedenen **Bewegungsfilter**, z. B. beim Wendevorgang (Land, Luft oder Wasser),
- Untersuchung von **Empfangsqualität und -alter der Korrekturinformationen** (Reichweite, Störeinflüsse, Topografieeinfluss, Rauschen) und
- Vergleich des **Genauigkeitsunterschieds von NMEA-Positionen** zu post-processed berechneten Positionen.

3. Phase - Untersuchung der Echtzeitfähigkeit

- **Bestimmung der Latenzzeiten** in Abhängigkeit von der Satellitenanzahl und
- Untersuchung des **Einflusses der Bewegungsart und Bewegungsgeschwindigkeit** beim Signalempfang sowie bei der Positionsberechnung.

Das **Prüfzertifikat** muss jeweils den **gesamten Testumfang** sowie die **Beobachtungszeit** und **-dauer** umfassen. Des Weiteren muss die **Zusammensetzung der geprüften Empfänger** exakt **beschrieben** werden (Firmware, Konfiguration, Antenne und Zubehör). Eine **Auflistung der Messbedingungen** (Witterung, Abschattungen, Referenzinformation, evtl. Störungen) sowie der **Führungsgenauigkeit** oder der **Genauigkeit des Referenzsystems** ist zwingend erforderlich.

Resümierend muss am Ende dieses Kapitels die Bedeutung des *zeitlichen Verhaltens beim Echtzeitbetrieb* wiederholt werden. In Abhängigkeit aufgelisteter Einflussparameter kann durch die dargestellte Untersuchungsstrategie mithilfe **angepasster Eichfunktionen** der systematische Fehleranteil aus der Latenzzeit Δt_{Out}^E nahezu

vollständig eliminiert werden. Des Weiteren wurden Empfehlungen formuliert, die aufbauend auf die „ION STD 101 Recommended Test Procedures for GPS Receivers“ die **Positionsgenauigkeiten** im Hinblick auf kinematische Anwendungen beschreiben. Trotz stetiger GPS-System- und Empfängererneuerungen ist diese allgemeine Vorgehensweise auf viele kinematische Anwendungen der GPS-Technologie übertragbar.

4 Zielverfolgender Servotachymeter

4.1 Technische Grundlagen

Ein weiteres Instrument zur Bestimmung von **präzisen Raumkoordinaten bewegter Objekte** stellt die **Totalstation** mit dem **Autotracking-Modul** [HENNES, 1999] dar. In der Literatur werden für diesen motorisierten Tachymeter mit automatischer Zielerfassung und Zielverfolgung verschiedene Bezeichnungen wie zielverfolgender Tachymeter, motorisierter Computer-Tachymeter, Messroboter, Ein-Mann-Station, terrestrisches Positionierungssystem (TPS), Robot-Tachymetersystem (RTS), Videotachymeter oder zielverfolgender Servotachymeter verwendet. Die grundlegenden Anwendungsbereiche Einzelpunktaufnahme, Satzmessung und Punktabsteckung eines elektronischen Tachymeters wurden durch die Funktionalitäten Motorisierung, elektronische Kompensation der primären Achsfehlereinflüsse, automatische Grob- und Feinzielung sowie durch die selbstständige Zielverfolgung erweitert. Die ersten Arbeiten zur Automatisierung von terrestrischen Vermessungsaufgaben mit elektronischen Tachymetern gehen bereits in die achziger Jahre zurück. In diesem Zusammenhang ist, wie bereits in der Einleitung erwähnt, das Projekt **GEOROBOT** des Geodätischen Instituts der Universität Hannover zu nennen [KAHMEN, 1984]. Aus einem gemeinsamen Forschungsprojekt an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich und der Firma Leica Geosystems entstand der erste Robotertheodolit **TOPOMAT** [MATTHIAS, 1991]. Weitere Instrumente universitärer Forschungsarbeiten stellten der **Wild TM3000V** sowie der **Kern E2-SE** dar. Mit dem Instrument Geodimeter 4000 der Firma Geotronics wurde 1990 der erste kommerzielle Servotachymeter mit automatischer Zielerkennung und -verfolgung angeboten. Eine aktuelle Übersicht der wichtigsten Geräte mit Unterteilung in verschiedene Genauigkeitsklassen wird z. B. in [DEUMLICH u. STAIGER, 2002] aufgeführt.

Der grundlegende Aufbau solcher Messroboter sowie die Unterteilung in unabhängige Subsysteme ist immer ähnlich. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich im Wesentlichen auf die Verwendung der **zielverfolgenden Servotachymeter TCA2003** und **TCA1101** der Fa. Leica Geosystems. Eine Zusammenstellung der wesentlichen Bestandteile zielverfolgender Servotachymeter kann aus dem nachfolgenden Flussdiagramm entnommen werden.

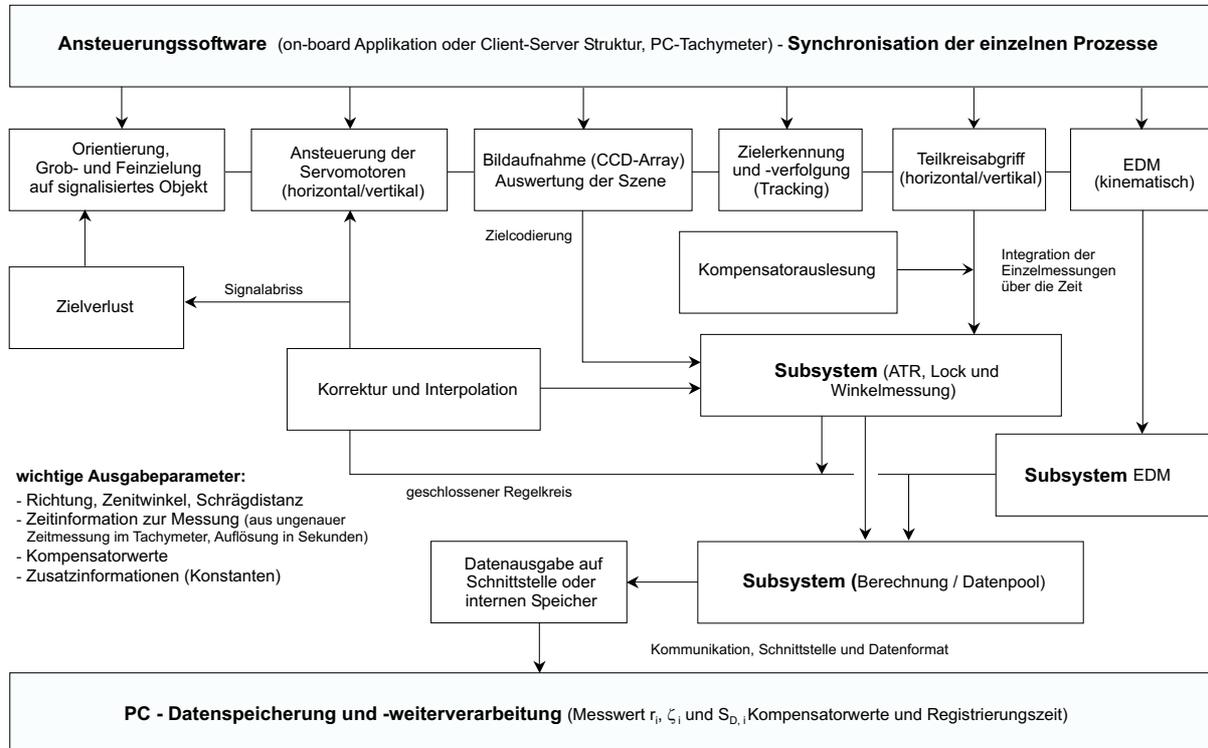


Abbildung 4.1: grundlegendes Funktionsprinzip zielverfolgender Servotachymeter

Anders als beim GPS- oder INS-Sensor bewegt sich hier üblicherweise das Messsystem nicht auf dem Objekt mit. Das Messergebnis wird lediglich aus den Beobachtungen zu einem signalisierten Zielpunkt (aktives oder

passives Prisma) am bewegten Objekt abgeleitet. Die Anwendungen des zielverfolgenden Servotachymeters in der Ingenieurgeodäsie reichen von automatisierten Deformationsmessungen (z. B. automatische Überwachung von Hangrutschungen oder Bauwerksüberwachung und -monitoring), der Maschinenführung während verschiedener Bauprozesse (Gleitschalungsfertiger, Asphaltfertiger und Grader), dem Einsatz als Referenzsystem zur Verifizierung von Gesamtsystemen (z. B. in den verschiedenen Bereichen des Precision Farming) und Kalibrierungsmessungen von Robotern bis hin zu den verschiedenen Sonderanwendungen (z. B. der Bestimmung von Schiffstrajektorien [CZAJA, et al., 2001]). Das geodätische Messsystem wird im Wesentlichen durch die Bewegungsart (stop-and-go, kriechend, gleichförmig oder beschleunigt), -geschwindigkeit (für Aufgaben der Maschinenführung unterteilt in quasi statisch, quasi kinematisch und kinematisch) und der -form (linear, kreisförmig, Klothoide, etc.) sowie die Reichweite eingeschränkt. Des Weiteren spielt die Lage der Prismenposition relativ zum Instrument eine erhebliche Rolle für die Zielverfolgung und Messunsicherheit. Die folgenden Darstellungen (Abb. 4.2 a - e) kinematischer Messanordnungen im Bezug zum Messinstrument veranschaulichen die jeweiligen Beobachtungsgrößen (δr = Richtungsänderung, $\delta \zeta$ = Zenitwinkeländerung und δS_D = Distanzmessungsänderung) während der Zielverfolgung.

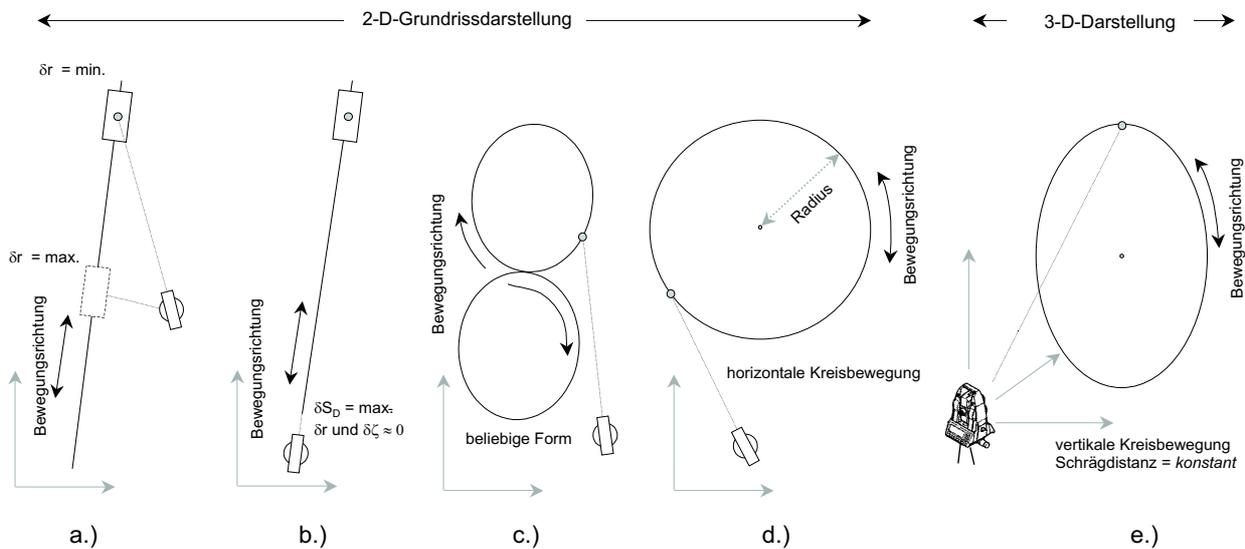


Abbildung 4.2: Tachymeterstandpunkt in Bezug zum bewegten Prisma

Die Messunsicherheit der einzelnen Messsubsysteme (im Wesentlichen δr , $\delta \zeta$ und δS) ergeben in Abhängigkeit der Verfolgungsgeschwindigkeit des zielverfolgenden Servotachymeters in horizontaler und vertikaler Richtung als Summe die Positionsgenauigkeit einer Beobachtungsreihe bewegter Objektpunkte. Anders als bei der Bewertung kinematischer GPS-Beobachtungen (Genauigkeit hängt nicht von den Bewegungsparametern ab, siehe hierzu Abb. 3.29) kann ohne einer detaillierten Beschreibung der kinematischen Messanordnung und der Bewegung (Art, Form und Geschwindigkeit) des Zielpunkts keine allgemein gültige Angabe zur Messgenauigkeit von zielverfolgenden Servotachymetern formuliert werden. Absolute Positionsgenauigkeiten wie z. B. im Leica „Reference-Manuel“ (TCA2003 - Tracking = 5 mm + 3 ppm, Rapid-Tracking = 10 mm + 3 ppm) können nur als grobe Orientierung zur Planung kinematischer Messungen verwendet werden. Zur Diskussion der Qualität einer kinematischen Messung mit dem zielverfolgenden Servotachymeter müssen vielmehr die einzelnen Messgenauigkeiten der Subsysteme separat sowie in ihrer gegenseitigen Wechselwirkung betrachtet werden. Der Richtungs- und Distanzplot (Abb. 4.3) mit entsprechender Differenzdarstellung (= Rohmesswert_i - Rohmesswert_{i-1}) am Beispiel der Messanordnung a und e veranschaulicht diesen Zusammenhang. Unter der Annahme, dass bei einer Abtastfrequenz von etwa 4 Hz (Messfrequenz des zielverfolgenden Servotachymeters) nur stetige Differenzplots der Richtungs- und Distanzmessung existieren, lassen sich so Messfehler zeigen.

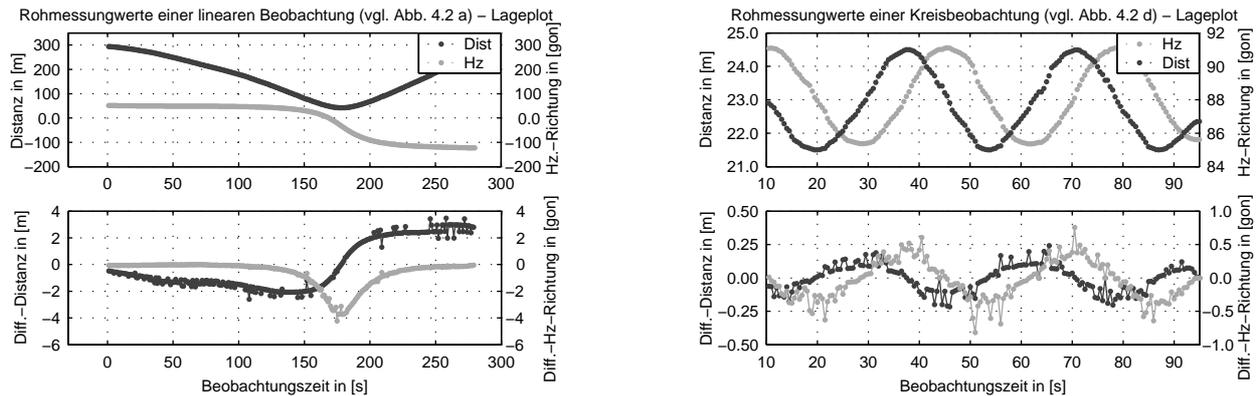


Abbildung 4.3: Darstellung der einzelnen Messelemente an den Bewegungen a.) und e.)

Standardisierung kinematischer Messungen

Verschiedene nationale und internationale Gremien beschäftigen sich seit vielen Jahren mit der Akkreditierung, Zertifizierung und Rückführung geodätischer Messungen. In Deutschland sind die wichtigsten Grundlagen der Messtechnik in der DIN 1319-1 bis 1319-4 und der Ingenieurvermessung in der DIN 18710 (aktuelle Überarbeitung [HEUNECKE, 2003]) erläutert. Der Arbeitskreis 5 des Deutschen Vereins für Vermessungswesen (DVW) bildet hierzu den Fachausschuss. Eine umfassende Sammlung aktueller Beiträge ist in der Schriftenreihe 42/2001 „Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik“ des DVW zusammengefasst. Die Kommission „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM“ [GUM, 1995] stellt die Grundlage der internationalen Begriffsdefinition im ISO-Standard (seit Mai 1999 als DIN V EN V 130005) dar. Spezielle Angaben zur Beschreibung der Messunsicherheit bei der Verwendung kinematischer Messverfahren sind hier nicht aufgeführt. Deshalb müssen einzelnen Arbeiten zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit und Fehlerbeschreibung von zielverfolgenden Servotachymetern (z. B. [HENNES, 1999] oder [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000]) eine besondere Bedeutung beigemessen werden. Die Betrachtung der einzelnen Komponenten sowie des Gesamtsystems ist bei der Kalibrierung hinsichtlich kinematischer Anwendungen maßgebend. Das nachfolgende Kapitel führt alle relevanten Einflussparameter des zielverfolgenden Servotachymeters bei kinematischen Applikationen auf. Außerdem werden Verfahren vorgestellt, die den bewegungsabhängigen Fehleranteil bestimmen und mittels angepasster Eichfunktionen minimieren.

4.1.1 Automatische Zielerfassung und -verfolgung

Mit dem Bau des ersten geodätischen Fernrohrs von Johannes Kepler um 1611 ergab sich die Möglichkeit Richtungen und Zenitwinkel zu einem Zielpunkt zu beobachten. Die optischen und mechanischen Bauteile dieser terrestrischen Vermessungsgeräte wurden in der Folgezeit für Aufgaben der Triangulierung, der Polygonierung, der Einzelpunktaufnahme oder der astronomischen Ortsbestimmungen angepasst und stetig weiterentwickelt. Erst die Möglichkeit einer digitalen Bilderfassung Anfang der achtziger Jahre mit Echtzeitauswertung ergab neue Entwicklungs- und Anwendungsvarianten. Der Leica Theodolit TM3000V (V steht für Video) mit integrierter Videokamera war einer der ersten Messroboter, der bereits viele Komponenten eines kommerziellen zielverfolgenden Servotachymeters beinhaltet. Das Funktionsprinzip und der Weg des Strahlengangs vom Sender (Prinzip des Infrarot-Zielkollimators [DEUMLICH u. STAIGER, 2002]) bis hin zum CCD-Array (charge couple device) wird z. B. in [KATOWSKI, 1989] ausführlich beschrieben. Durch ein kippbares Prisma im Theodolit kann auf die Abbildung des Messfeldes gewechselt werden. Hierbei wird zusätzlich ein Referenzrahmen auf dem CCD-Array abgebildet, der als Ersatz für die sonst übliche Strichplatte fungiert. [CHALUPA, 1997] beschreibt hierzu ein Verfahren, das eine Kalibrierung der CCD-Kamera ermöglicht. Das motorgetriebene verstellbare Fokussierglied kann beim TM3000V für unterschiedliche Entfernungen stufenlos scharf gestellt werden. In [SCHIRMER, 1994] wird ein Verfahren zur Bilderkennung beschrieben, das Sterndurchgänge mit einem Kern DKM 3-A und einer externen CCD-Kamera kombiniert und auswertet. Der sensible Aufbau sowie die mangelnde Feldtauglichkeit schränkten dieses System jedoch im erheblichen Maße ein. Der gegenwärtige Entwicklungsstand von motorisierten Servotachymetern ist weit vorangeschritten und es existieren zwischenzeitlich viele verschiedene Modelle aller namhaften Tachymeterhersteller in unterschiedlichen Genauigkeitsklassen. Die Fa. Sokkia

bietet sogar ein Instrument ohne Okular an. Manuelle Anzielungen durch den Operateur sind bei diesem Gerät nicht mehr möglich.

Die einzelnen Subsysteme des zielverfolgenden Servotachymeters mit den entsprechenden Sehfeldern (Field of View, FoV) unterteilen sich nach CCD-Array, Öffnungswinkel des Fernrohrs, Zielerkennung (Automatic Target Recognition, ATR) und -verfolgung (Lock) sowie dem elektronischen Distanzmesser (EDM) (vgl. Abb. 4.4 links). Beim den Leica Tachymeter TCA2003 sind diese Größen des FoV wie folgt definiert:

- Fernrohr, FoV = $\pm 1,5$ gon,
- ATR (mit integrierter Zielverfolgung), FoV = $\pm 0,25$ gon und
- EDM, FoV = $\pm 0,05$ gon.

Eine im Instrument integrierte Zielfeldbeleuchtung strahlt in Richtung der Zielachse ein Licht im Infrarot-Spektrum aus. Das an der passiven Zieleinrichtung reflektierte Signal erscheint anschließend zusammen mit dem Anteil aus dem normalen sichtbaren Licht und dem aus dem EDM ausgesendeten Lichtanteil im Objektiv. Das eintreffende Lichtbündel wird anschließend durch einen Strahlungsteiler aufgespalten und separiert. Ziel dieses Strahlungsteilerwürfels (optisches Bauteil zwischen dem Objektiv und dem Okular als halb durchlässiger Spiegel) ist es, die geeigneten Anteile des eintreffenden Lichtes auf dem CCD-Array abzubilden (vgl. Abb. 4.4 Mitte). Der isolierte ATR-Strahl wird über einen Umlenkspiegel und mehrere Vergrößerungslinsen dem CCD-Array zugeführt. Beim TCA2003 ist die Empfangseinheit der ATR-Messsignale für den nicht sichtbaren Bereich konzipiert. Grundsätzlich besteht jedoch auch die Option, nicht signalisierte Objekte aufzunehmen und auszuwerten. In [WASMEIER, 2002] wird ein Tachymetersystem auf der Basis von photogrammetrischen Auswertetechniken zur automatischen Objektextraktion von Kirchtürmen vorgestellt. Als geodätische Anwendung wurde in dieser Diplomarbeit der Rückwärtsschnitt bezogen auf die automatische Erkennung verschiedener Kirchtürme (siehe Abb. 4.4 rechts) realisiert und einer konventionellen Methode gegenüber gestellt.

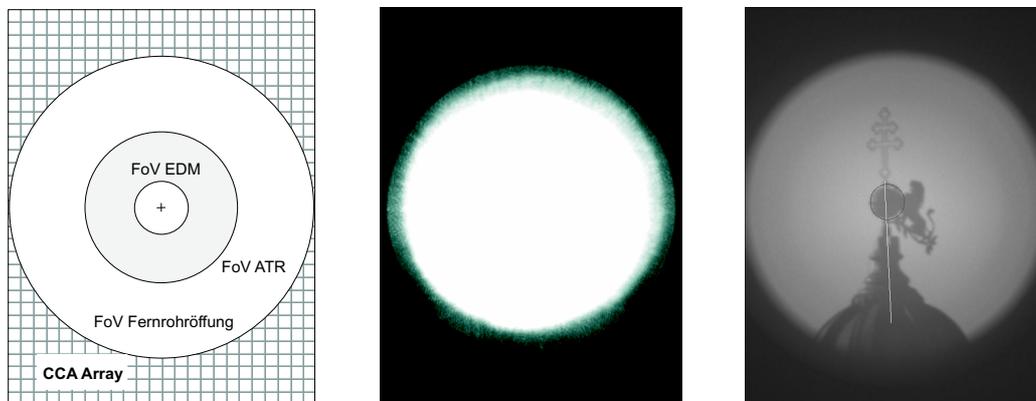


Abbildung 4.4: Größe des CCD-Arrays / digi. Prismenspot - Abstand 3,00 m / digi. Bild der CCD-Kamera

Die Empfangseinheit zur Detektion des Laserstrahls im Leica TCA2003 Tachymeter ist ein Sony ICX055AL CCD-Chip (<http://www.sel.sony.com/semi/PDF/ICX055BL/pdf>). Dieser 1/3-inch Sensor für 8 Bit-Graustufen-Bilder basiert auf der in Europa üblichen Video-Norm CCIR (Comité Consultatif de la Radiodiffusion, Schwarz-Weiß-Norm mit der Netzwechselfrequenz von 50 Hz). Seine effektive Bildgröße beträgt 500×582 Pixel (horizontal \times vertikal). Zum Vergleich besitzt z. B. der Trimble Elta S eine Pixelauflösung von 768×582 . In [JOECKEL u. STOBBER, 1999] werden sogar Instrumente mit einer CCD-Auflösung von 2000×3000 Pixel erwähnt. Aus der unterschiedlichen Zellengröße $9,8 \mu\text{m}$ (vertikal) und $6,3 \mu\text{m}$ (horizontal) ergibt sich die physikalische Größe des Chips von $4,90 \text{ mm} \times 3,67 \text{ mm}$. Die Genauigkeit der Chipgeometrie wird vom Hersteller mit der Unsicherheit von etwa 1 %, d. h. $\sim 0,1 \mu\text{m}$ angegeben. Wird das CCD-Bild mit einer PC-Framegrabber-Karte extern aufgezeichnet, erscheint die Bildszene mit der intern interpolierten Auflösung der Registrierung (z. B. mit der Matrox-Meteor-II/Standard-Karte [MATROX, 1999] in 768 Zeilen- und 576 Spaltenpixel). Der CCD-Sensor ist mit dem Instrumentengehäuse des TCA2003 fest verbunden, somit wird die relative Lage stabil

gehalten. Einflussgrößen wie Belichtungszeiten, Eliminierung von Störreflexionen, Sendemodulation, Bildfrequenz, Ansprechzeiten des CCD-Sensors auf die IR-Strahlung und eine leichte Verkippung des Sensors spielen für die anschließende Bildauswertung eine elementare Rolle.

Zur Echtzeitauswertung einer Szene muss in der Regel nicht das gesamte CCD-Bild verwendet werden. Zunächst kann das rechteckige CCD-Array auf die Größe des Fernrohausschnitts beschränkt werden (siehe Abb. 4.4 links). Dadurch wird nur die „Region of Interest“ (RoI) betrachtet. Des Weiteren bietet sich bei der Auswertung einer Prismenverfolgung an, nicht jede einzelne Zeile bzw. Spalte in die Schwerpunktsberechnung einzubeziehen. Somit ergeben sich für die Auswertung von ca. 50 Bildszenen pro Sekunde mit dem Bildverarbeitungsprozessor des Leica TCA2003 keine Schwierigkeit bei Echtzeitanwendungen. Bei der Erfassung eines Prismas oder einer Reflexfolie wird zunächst zwischen einer Grob- und Feinzielung unterschieden. Zunächst muss das Instrument sein Ziel „lernen“. Dabei sucht das Instrument einen vorgegebenen Objektraum durch Ansprechen der Servomotoren im Zusammenspiel mit der Bildauswertung ellipsen-, spiralen- oder linienförmig ab [DEUMLICH u. STAIGER, 2002]. Idealerweise sollte dieser Suchbereich in Anpassung der Applikation eingeschränkt werden. Wird ein reflektiertes Signal des ausgesendeten Laserstrahls erkannt, so werden in Abhängigkeit vom Hintergrund, von den Umgebungsverhältnissen und von der Qualität der Projektion die Kameraparameter gesetzt. Dadurch können bei der Zielverfolgung anschließend Fremdlichteinflüsse oder Störreflexionen besser eliminiert werden. Die Belichtungszeiten werden während der Kamerainitialisierung automatisch festgelegt, können aber auch durch den Benutzer manuell verändert werden (GeoCOM-Funktion). Bei der fixfokussierten Kamera des Leica TCA2003 sind dies sieben Stufen von $100 \mu\text{s}$ bis 8 ms. Der CCD-Chip ist aus Platzmangel im Instrumentengehäuse um etwa 90° gedreht eingebaut und fest verbunden. Somit wird eine Beibehaltung der relativen Kameraorientierung gewährleistet. Dies ist bei der Auswertung des Spots auf dem CCD-Array zu berücksichtigen. Die Restverkippung wird durch eine einfache Affintransformation mit den firmenspezifischen Kalibrierungsparametern eliminiert [KUHLMANN, 1999]. In [WASMEIER, 2002] wird ein Kalibrierungsverfahren mit einer Lichttafel erläutert, mit dem diese Korrekturwerte überprüft werden können.

Durch die einfache Summenbildung in Zeilen- (i) und Spaltenrichtung (j) aus den Helligkeitsparametern $P(i, j)$

$$r_{zentr} = \max\left(\sum_{i=1}^{576} P(i, j)\right) \quad \text{und} \quad \zeta_{zentr} = \max\left(\sum_{j=1}^{768} P(j, i)\right) \quad (4.1)$$

wird der Schwerpunkt der Bildszenen durch den Hardware-nahen Baustein ASIC (Application Specific Integrated Circuit) im TCA2003 exakt bestimmt. Die Auswertung der Grauwertpixel (Wert zwischen 0 - 255) ist an den beiden folgenden Bildszenen mit unterschiedlichen Entfernungen dargestellt.

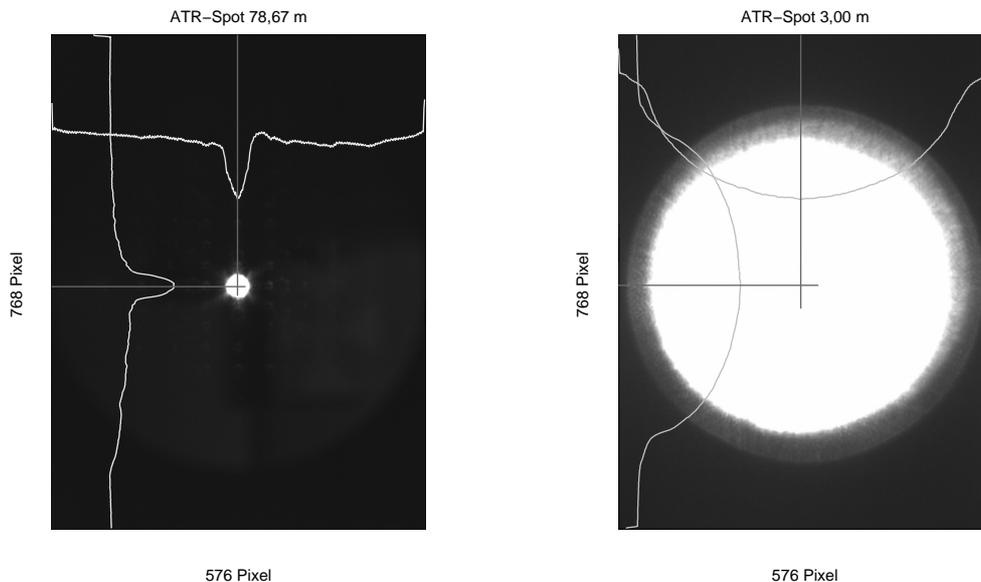


Abbildung 4.5: Bildauswertung des Leica TCA2003 mit zwei unterschiedlichen Entfernungen

Durch diese einfache Bildauswertung wird in der Feinzielung das Tachymeterfernrohr auf das Prismenzentrum nachgestellt. Beim Leica TCA2003 wird diese Funktion der Bildererkennung als ATR-Modus bezeichnet. Eine Zielverfolgung ist mit der ATR nicht möglich. Evtl. Restfehlrichtungen (sichtbar durch minimale Ablagen des Fadekreuzes zum Prismenzentrum) werden von dem Bildalgorithmus softwaretechnisch berücksichtigt. Aktive Zielmarken (wie z. B. beim Geodimetersystem ATS) besitzen sowohl sendende als auch messende Eigenschaften. Am Prisma ist hier eine aktive Infrarot-Diode integriert.

Ist der automatische Zielverfolgungsmodus (**Lock-Modus**) aktiv, so wird das Instrument selbstständig dem Prisma nachgeführt. In Abhängigkeit der Bewegungsart und -geschwindigkeit sowie der Reichweite wird der Ablagevektor zwischen dem Bildmittelpunkt und dem detektierten Spot in Echtzeit berechnet und über die Servomotoren in horizontaler und vertikaler Richtung selbstständig nachgeführt. Beim Leica TCA2003 sind konstante Bewegungen mit dem Prisma bis zu 7 m/s bei einer Entfernung von etwa 20 m möglich (~ 20 gon/s max. Verfolgungsgeschwindigkeit). Bei sehr kurzen Visuren (kleiner 3 m) kann u. U. der gesamte Spot am CCD-Array nicht mehr vollständig abgebildet werden, was zu einer falschen Bildauswertung führt [STEMPFHUBER, 1998].

Das folgende Ablaufdiagramm (Abb. 4.6) stellt die einzelnen Funktionen von Aktiv- und auch Passivsystemen zur Zielerkennung und -verfolgung dar.

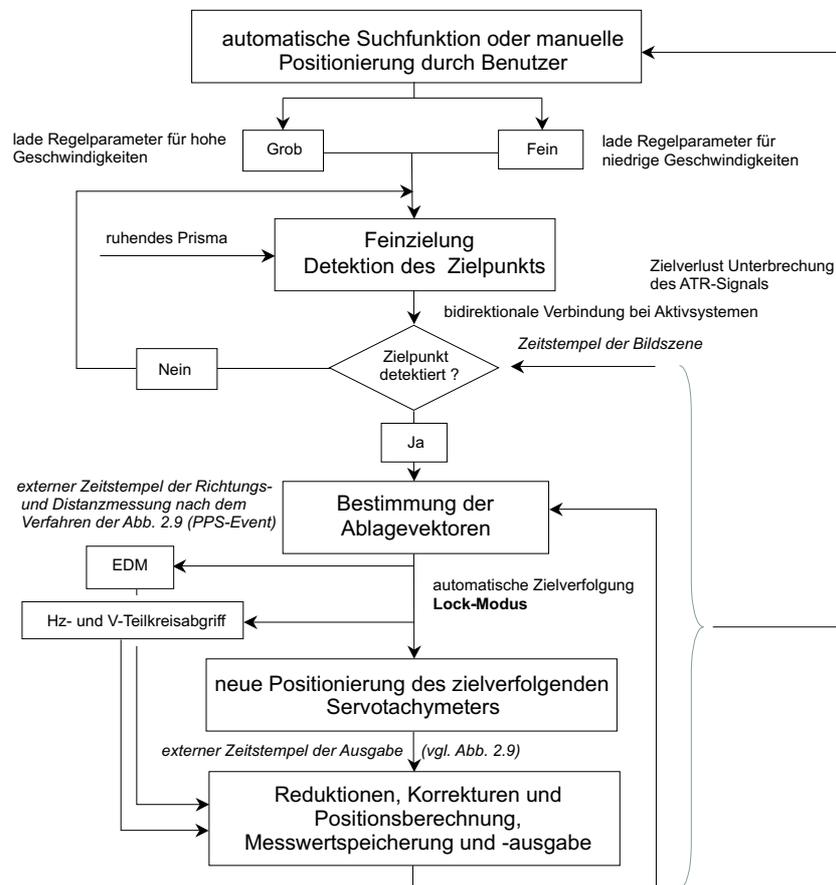


Abbildung 4.6: Ablaufdiagramm einer automatischen Zielverfolgung

Treten Hindernisse im Zielstrahl auf, so werden diese Signalunterbrechungen durch eine Prädiktionsfunktion (Extrapolation aus Verfolgungsrichtung und -geschwindigkeit) über mehrere Sekunden von der Zielverfolgungssoftware überbrückt. Beim Leica TCA2003 sind dies die Größen bis 3 Sekunden oder kleiner 3 gon Richtungsänderung. Außerdem können Lichtreflexionen oder starke Vibrationen des Prismas zu einer Unterbrechung der Zielverfolgung führen. Das automatische Wiederauffinden eines bewegten Prismas ist nur begrenzt möglich. Die Spezifikationen des FoV der Zielverfolgung und der EDM sowie die Initialisierungszeit der Kamera sind hierfür nicht ausgelegt.

4.1.2 Externe Geräteansteuerung und automatisches Messen im Trackingmode

Zielverfolgende Servotachymeter können durch eine individuelle Programmierung für die verschiedenen geodätischen Messungen angepasst werden. Besonders bei kinematischen Messaufgaben ist eine Adaption der Motorisierung, der Abgrenzung des Messbereichs sowie der erforderlichen Konfiguration des Tachymeters hinsichtlich der Aufgabenstellung erforderlich. Eine grundsätzliche Unterteilung der Beobachtungs- und Motorisierungssoftware in eine **on-board Applikation** und eine **externen Ansteuerung** kann bei allen Instrumententypen unabhängig vom Hersteller erfolgen. Abbildung (4.7) zeigt dies als grafische Übersicht.

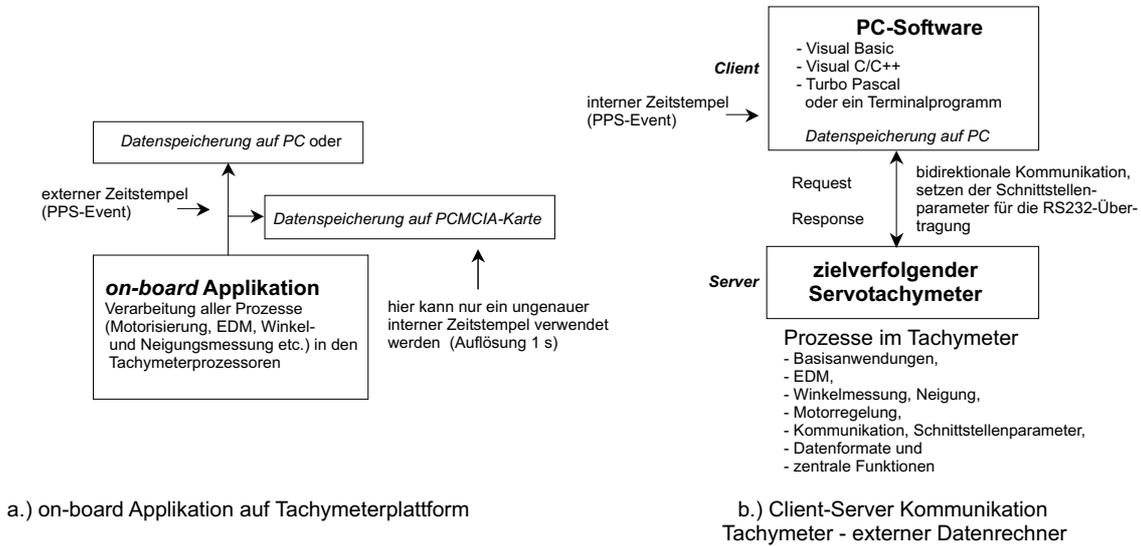


Abbildung 4.7: on-board Applikation / Client-Server Applikation

Die on-board Software ist zum einen durch ihre eingeschränkte Funktionalität und zum anderen durch die geringere Leistungsfähigkeit des Tachymeterprozessors nur bedingt für kinematische Messungen geeignet. Bei Leica Tachymetern der Generation TPS1100 kann dies durch die Entwicklungsumgebung **GeoBasic** (aktuelle Version GB Studio 2.10, Frühjahr 2003) umgesetzt werden. Der funktionale Aufbau ist ähnlich der Programmiersprache Visual-Basic von Microsoft. Auf der Basis des kommerziellen Quellcodes *FastRecord* der Fa. Leica (fest vorgegebene Konfigurationen) wurde eine eigene Software zur Bearbeitung individueller Aufgaben erstellt. Abbildung (4.8 links) zeigt das Ausgabefile, d. h. die Messrate kinematischer Beobachtungen (Zuweisung durch PPS-Event, siehe Abb. 2.9). Die Ausgabe der internen Tachymeteruhr (Auflösung 1 Sekunde) ist nur als grobe Zeitinformation bei der Auswertung verwendbar. Die Messrate beträgt je nach verwendeter Messart (z. B. Streckenmessung mit *Rapid-Tracking* oder *Tracking*) und Gerätekonfiguration (z. B. Kompensator ein/aus) beim TCA2003 oder auch beim TCRA1101plus etwa 2-3 Hz.

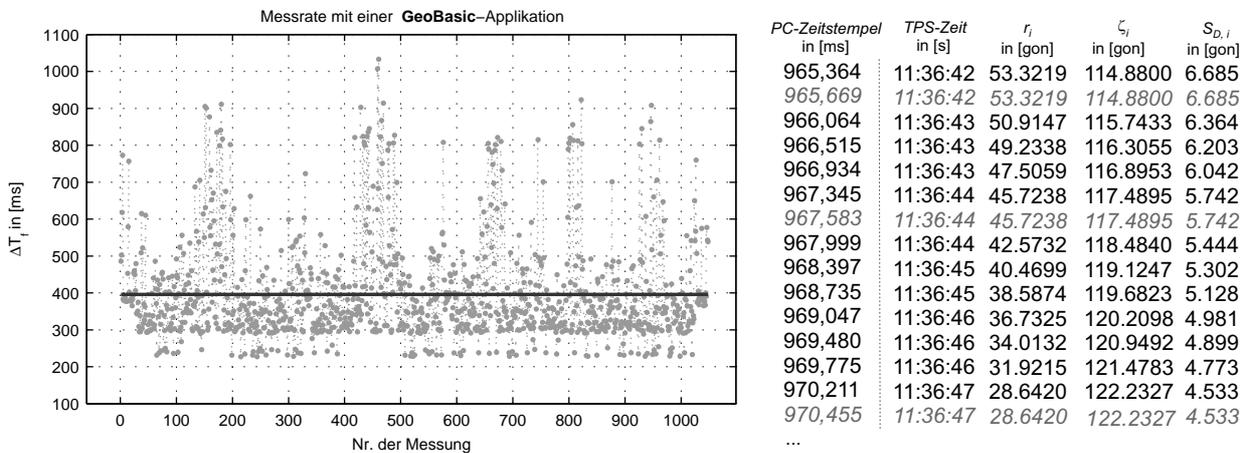


Abbildung 4.8: Messrate mit dem TCRA1101plus / Daten-Logfile

Das Messfile der Datenaufzeichnung bei dieser Anwendung enthält immer wieder fehlerhafte Zeilen. D. h. der aktuelle Messwert der Epoche i wird nicht immer vom **Subsystem Datenpool** aktualisiert und somit falsch ausgegeben. Die PC-Registrierungszeit hingegen enthält immer gleichabständige Intervalle. Ein Auszug eines Rohmessfiles illustriert dies (vgl. Abb. 4.8 rechts).

Eine zweite Möglichkeit der Konfiguration, Steuerung und Messausführung bzw. -registrierung von zielverfolgenden Servotachymetern der Fa. Leica besteht durch die Sendung und Aufzeichnung von **GeoCOM-Servicebefehlen** (z. B. für die Funktion `GetSimpleMea{}` den Zeichensatz `%R1Q,2108:0`) oder mittels **GSI-Steuerzeichen** (z. B. „Get Slope Distance“ `GET/M/W122<CR><LF>`). Um die volle Leistungsfähigkeit für kinematische Anwendungen auszunutzen, muss die **GeoCOM-Schnittstelle** (Client-Server Architektur) verwendet werden. Diese offene und im GeoCOM-Reference Manuel dokumentierte Schnittstelle kann z. B. unter Visual Basic und C/C++ (C/C++ geeignet für Echtzeitanwendungen) realisiert werden. Dieses synchronisierte Kommunikationstool bietet verschiedene und für kinematische Aufgaben angepasste Funktionen für die Initialisierung, Konfiguration und Registrierung von Messdaten (z. B. `TMC_GetSimpleMea{}`, `TMC_GetAngle1{}`, `TMC_GetAngle5{}`, `TMC_GetCoordinate{}`, etc.). Mit der Funktion `TMC_GetQuickDist{}` werden im Gerät alle Parameter (Kameraeinstellung, Art der kinematischen Streckenmessung, Synchronisation, Minimierung der Totzeiten, etc.) automatisch für die kinematische Beobachtung bewegter Zielpunkte optimiert eingestellt. Außerdem erkennen diese GeoCOM-Funktionen selbstständig, ob sich das Prisma bewegt und verändern zeitgleich interne Parameter. Diese Funktion verwendet im Lock-Modus während der Zielverfolgung einen vereinfachten Algorithmus zur Positionsberechnung, da hierbei die Messrate geringer ist als bei unbewegten Zielen. Dies wird in der Gegenüberstellung von ΔT_f aus statischen und kinematischen Messungen mit `TMC_GetQuickDist{}` deutlich (siehe Abb. 4.9 links). Die Messrate der GeoCom-Funktion `TMC_GetAngle1{}` ist etwa um den Faktor 2 geringer, ein Unterschied zwischen statischen und kinematischen Beobachtungen existiert jedoch auch hier (siehe Abb. 4.9 rechts).

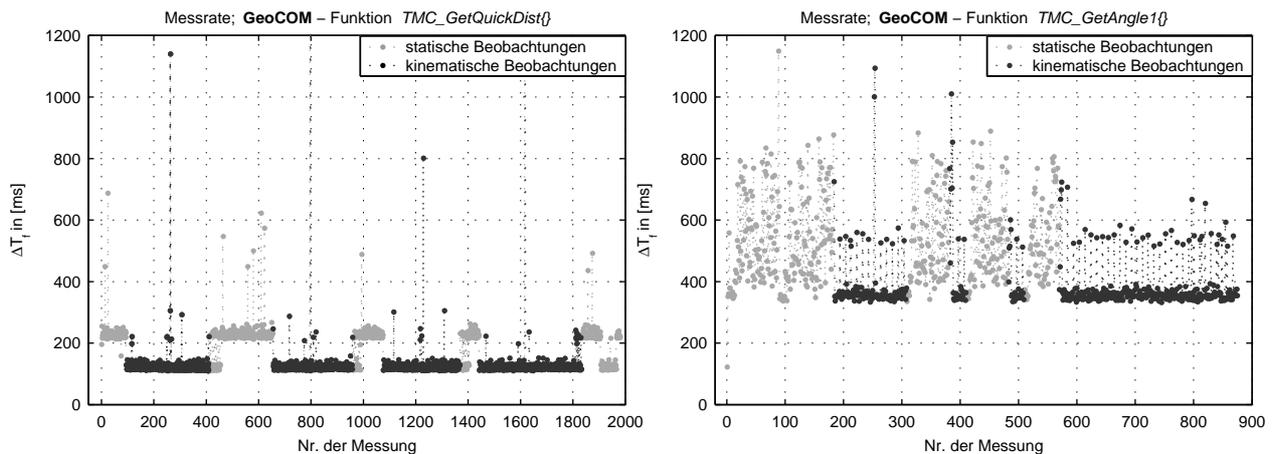


Abbildung 4.9: Messrate zweier unterschiedlicher GeoCOM-Funktionen bei „stop-and-go“-Beobachtungen

Beim zielverfolgenden Servotachymeter Elta S von Zeiss kann das unter Borland C++, Turbo Pascal oder Power Basic compilierte Messprogramm sowohl als on-board als auch als externe Applikation (Client-Server Applikation) verwendet werden. Zur Vereinfachung und Vereinheitlichung der Sensorprogrammierung (Tachymeter, GPS oder INS) wäre für die Zukunft eine Standardisierung der Sensorprogrammierung wünschenswert. Zur Weiterverarbeitung der Messdaten auf der Basis der Metasprache XML (Extensible Markup Language) könnte der Auswerteprozess durch die Vorgabe der Datenstruktur vereinfacht werden. Hierbei übernimmt ein zusätzliches File die automatische Integration der Beobachtungen und die Formatbeschreibung. Zusätzliche Auswertungen und Visualisierungen können so ohne Dateneditierung unabhängig vom Gerätetyp erfolgen. Einige GIS Produkte bieten gegenwärtig solche Formate zur Integration von Geometriedaten an.

4.1.3 Winkelmessung bei kinematischen Anwendungen

Die automatische Bestimmung des Richtungs- und Zenitwinkels erfolgt durch den optoelektronischen Abgriff am Horizontal- und Vertikalteilkreis in Wechselwirkung zum ausgewerteten digitalen Spot (vgl. Abb.

4.4). Bei diesem Vorgang wird an einem codierten Teilkreis inkrementell oder absolut die Position bestimmt [JOECKEL u. STÖBER, 1999]. Die verschiedenen Systeme unterscheiden sich hierbei im Verfahren mit einer seriell codierten Spur (Abb. 4.10 links und Mitte) oder mehreren parallel codierten Spuren (Abb. 4.10 rechts). Des Weiteren unterscheidet man zwischen Durchlichtverfahren (Glasscheibe mit lichtundurchlässiger Codierung) und Auflichtverfahren (Reflexion).

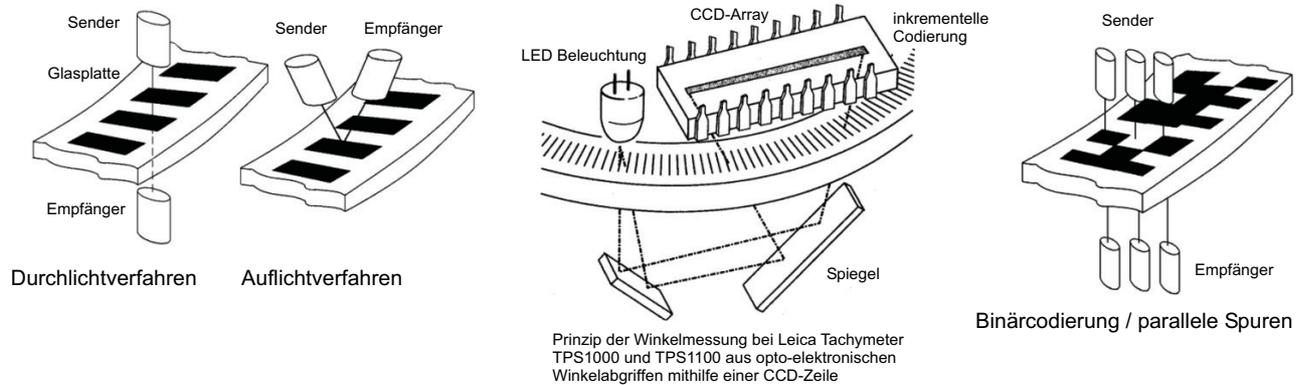


Abbildung 4.10: verschiedene Abtastverfahren zur autom. Teilkreisablesung, [ZEISKE, 1999]

Bei den Leica-Instrumenten wird die serielle Codierung über einen linearen CCD-Array und einen A/D-Wandler ausgelesen und liefert somit die Grobpositionierung auf etwa 0,3 gon [ZEISKE, 1999]. Die genaue Bestimmung der Feinzielung ergibt sich durch die aufgenommenen Codestriche und deren Mittelbildung (mindestens 10, meist jedoch etwa 60 Codestriche, siehe Abb. 4.10 Mitte). Beim Zeiss Elta S10/20 erfolgt die Bestimmung der Richtung und des Zenitwinkels durch ein modifiziertes Inkrementalverfahren mit berechenbarer absoluter Teilkreisanzeige [FEIST, 1998]. Bei dem Instrument Leica T2000 wurde ein dynamisches Verfahren angewendet. In den Geräten der Fa. Geotronics findet das „Stator-Rotor-Prinzip“ des Rundinductosyn-Systems für die Teilkreisabtastung Anwendung [WITTE u. SCHMIDT, 2000].

In [WASMEIER, 2002] ist der Übergang vom Pixelsystem aus der CCD-Bildszene ins entsprechende Horizontal- und Vertikalwinkelsystem durch die affine Transformation

$$\Delta r = a_{ATR,1} \cdot (R - R_0) + a_{ATR,2} \cdot (C - C_0) \quad (4.2)$$

$$\Delta \zeta = b_{ATR,1} \cdot (R - R_0) + b_{ATR,2} \cdot (C - C_0) \quad (4.3)$$

mit

- R = Pixelwert in Zeilenrichtung des CCD,
- C = Pixelwert in Spaltenrichtung des CCD,
- R_0 = Bildhauptpunkt in Zeilenrichtung und
- C_0 = Bildhauptpunkt in Spaltenrichtung

ausführlich beschrieben. R_0 und C_0 bilden den Rahmen des CCD-Systems und die Größen $a_{ATR,1}$, $a_{ATR,2}$, $b_{ATR,1}$, $b_{ATR,2}$ geben die vier Parameter der Affintransformation an. Korrekturen bzgl. des Ziellinien- und des Kippachsenfehlers, der Stehachsenchiefe, der ATR-Nullpunktsexzentrizität (Winkeldifferenz in Hz- und V-Richtung zwischen der Ziellinie und dem Zentrum der CCD-Arrays) sowie des Höhenindex werden korrigiert. Interpolationsfehler während der Code-Auswertung sind nicht eliminierbar. Ungenauigkeiten während der Winkelmessung entstehen entweder aus Modellfehlern oder aus Parameterfehlern (abhängig von der Temperatur und der Wellenlänge des Lichts) während der Transformation des Bildsystems in das Messsystem. Ein kleines FoV kann nur achsnahe Strahlen aufnehmen, ein großes FoV erzeugt hingegen verstärkt Verzeichnungsprobleme. Verfahren auf der Basis von Interferometermessungen zur Bestimmung der Teilkreisfehler wurden bereits

Ende der achziger Jahre durch die Teilkreisprüfmaschine vorgestellt. Heute sind die Fehler moderner Präzisionstachymeter bzgl. der Strichteilung und der Teilkreisexzentrizität durch einen symmetrischen Abgriff und anschließender rechnerischer Fehlerkorrektur nahezu vollständig eliminiert und deshalb auch vernachlässigbar klein. Interpolationsfehler existieren in den Messergebnissen von Richtungsbeobachtungen jedoch weiterhin.

In [INGENSAND, 2001] sind sowohl die Einflüsse der Stativhöhe (1-2 mgon), der Stativverdrehung durch Reibungskupplung der Richtungsbeobachtung als auch der Einfluss des Tastendrucks durch den Operateur (~ 1 mgon) aufgeführt. In [STAIGER, 1998] wird sogar von einer Fernrohrsauslenkung während der Tachymeterbedienung von horizontal = 9 mgon und vertikal = 3 mgon berichtet. Wegen der unterschiedlichen Störung des Flüssigkeitshorizonts des Kompensators bei der Zielverfolgung ist es ratsam keine aktuell erfassten Neigungskorrekturen anzubringen. Untersuchungen mit dem Leica TCRA1101plus zeigen eine systematische Verfälschung der online korrigierten Kompensatorwerte in Bezug zur Bewegung (abhängig von der Richtungs- und Zenitwinkelmessung) von bis zu 15 mgon (Abb. 4.11). Der Zeitraum des Einschwingverhaltens im Flüssigkeitshorizont des Kompensators beträgt nach [INGENSAND, 2001] ca. eine Minute.

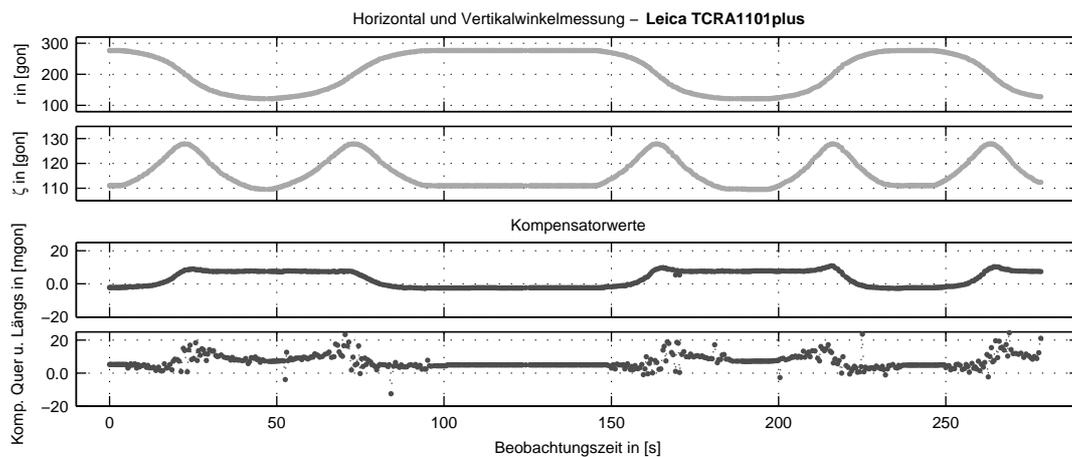


Abbildung 4.11: systematische Verfälschung der Kompensatorwerte während der Zielverfolgung

Da eine ständige Ausrichtung des Prismas zur Ziellinie des Tachymeters während der Bewegung nicht möglich ist, wird für kinematische Beobachtungen ein 360° -Reflektor eingesetzt. Wegen der Zusammensetzung einzelner Prismen zu einem Rundumprisma erzeugen vor allem die Kantenübergänge Fehler von mehreren Millimetern, bzw. mgon in der Winkel- und Distanzmessung. In [HENNES u. FAVRE, 2000] wird eine umfassende Untersuchung von 360° -Reflektoren bzgl. der Distanz-, Richtungs- und Höhenablagen, der Steilheit der Visuren, der Wiederholbarkeit, des zyklischen Richtungsfehlers sowie der Verschwenktheit des Prismas und der damit resultierenden Zielstrahlbrechung (Berücksichtigung des Brechungsindex von Glas bei elektromagnetischen Wellen) verschiedener Prismentypen dargestellt. Eine sehr einfache Methode der Genauigkeitsüberprüfung des Prismas kann durch die Anordnung der Abbildung (4.12) vom Anwender selbst durchgeführt werden.

Um den separaten Einfluss des 360° -Reflektors zu bestimmen, ist die Differenzbildung aus statischen Beobachtungen zu einem hoch präzisen Standardprisma (z. B. das Leica-GRZ1 mit einer Genauigkeit $\ll 1$ mm) bzgl. der Distanz-, Richtungs- und Zenitwinkelmessung zu reduzieren.



Abbildung 4.12: Anordnung zur Genauigkeitsuntersuchung eines 360° -Reflektors

Die folgende Abbildung zeigt das Messrauschen einer Beobachtung im Trackingmode bei einer permanenten Prismadrehung. Die Orientierung des Prismas zur Zielstrahl wurde dabei nicht berücksichtigt. Bei einer Entfernung Instrument-Prisma von etwa 11,5 m ergänzen sich die Ergebnisse mit den Genauigkeitsuntersuchungen der Längs- und Querabweichungen aus der Arbeit [HENNES u. FAVRE, 2000].

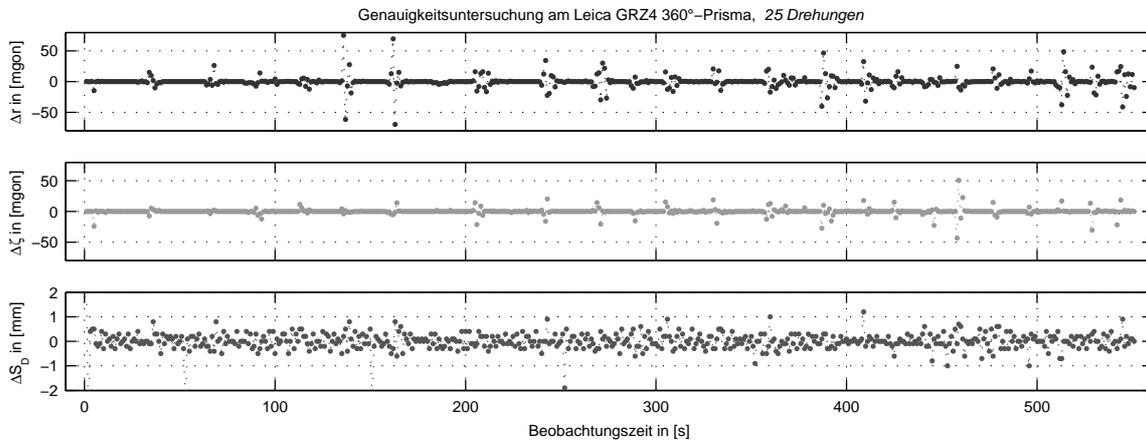


Abbildung 4.13: Abweichungen des GRZ4 360°-Reflektors von Leica, [STEMPFHUBER, 1998]

Außerdem sind beim Fehlerbudget kinematischer Tachymetermessungen die bekannten Einflüsse der Refraktion während der Winkelmessung zu nennen. Eine Minimierung des Refraktionseinflusses durch „gegenseitig-zeitliche“-Messungen sind im Trackingmode natürlich nicht möglich. Da kinematische Messungen zeitgleich stets nur in einer Lage möglich sind, kann dieser Fehlereinfluss nur bedingt durch entsprechende Modellierung der Ausbreitungsbeugung entlang des Messstrahls minimiert werden.

Erstreckt sich die Reichweite über eine größere Distanz, so muss zur fehlerfreien Höhenbetrachtung der Messungen mit dem zielverfolgenden Servotachymeter die Erdkrümmung berücksichtigt werden. Besonders beim Vergleich zwischen GPS-Höhen (ellipsoidische Höhen) mit Tachymeterhöhen (lokales kartesisches Koordinatensystem) tritt dieser Unterschied in Erscheinung. Durch die Formel [SCHNÄDELBACH, 1996]

$$c_K = \frac{E_i^2}{2 \cdot (R + H_{Ell})} \cdot \sin^2(\zeta_i) \quad (4.4)$$

mit

- $(R + H_{Ell})$ = mittlerer Erdradius + ellipsoidische Höhe,
- E_i = Länge der Bewegungspur,
- ζ_i = Zenitwinkel und
- c_K = Fehler in der Höhe, verursacht durch die mittlere Erdkrümmung

ohne Berücksichtigung der Strahlungskrümmung entlang des Zielstrahls kann dies sehr einfach in einer Simulationsrechnung (Ergebnisse für 1 km und 10 km Trajektorienlänge, Abb. 4.14) abgeschätzt und bewertet werden.

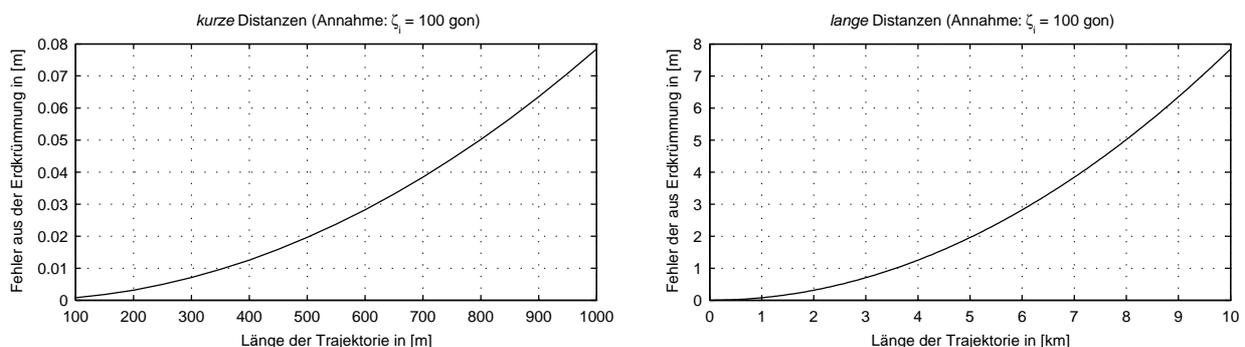


Abbildung 4.14: Auswirkung der Erdkrümmung auf die Höhenkomponente - *Simulationsrechnung*

GPS-Höhen werden durch das zugrunde liegende WGS84-Referenzellipsoid in ellipsoidischen Höhen H_{EU} angegeben. Bei der Tachymetermessung ergibt die Zenitwinkelmessung eine Differenz zur Tangentialebene mit dem Ursprung in der Ziellinie des Instruments. Die Flächennormale beschreibt diesen Unterschied. Am Beispiel einer kombinierten Messung mit GPS und einem zielverfolgenden Servotachymeter (unkorrigierte Rohmessungen bzgl. der Erdkrümmung) wird dieser Zusammenhang auf einer Länge von mehreren 100 m im folgenden Höhen- und Differenzplot (4.15) deutlich. Durch die manuelle Berücksichtigung von

$$H_{i,Korr} = E_i \cdot \cos(\zeta_i) - \frac{E_i^2 \cdot k_L}{2 \cdot (R + H_{EU})} \cdot \sin^2(\zeta_i) + \frac{E_i^2}{2 \cdot (R + H_{EU})} \cdot \sin^2(\zeta_i) \quad (4.5)$$

mit

- E_i = Länge zwischen Instrumentenstandpunkt und Zielpunkt,
- ζ_i = Zenitwinkel zur entsprechenden Messepoche sowie
- k_L = Refraktionskoeffizient

jeder einzelnen Beobachtung ergibt sich folgende Korrektur (Abb. 4.15 zeigt den Höhenunterschied aus kombinierten Messungen einer Schiffsbewegung mit dem zielverfolgenden Servotachymeter und GPS).

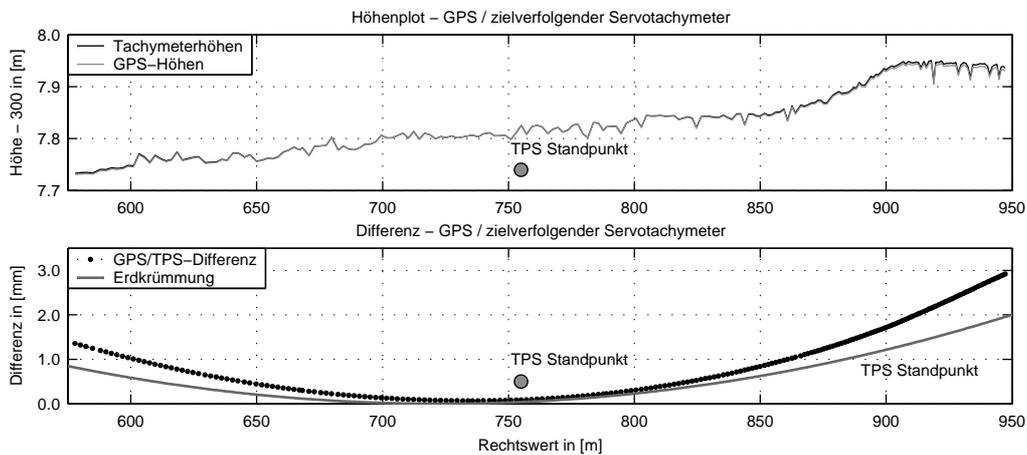


Abbildung 4.15: Vergleich GPS-Tachymeterhöhen / Differenz

In diesem Zusammenhang ist außerdem der Einfluss der Refraktion auf lange Entfernungen mit zielverfolgenden Servotachymetern zu berücksichtigen. Bei einem unbekanntem Refraktionskoeffizienten wird in der Regel der übliche Wert von $0 \leq k_L \leq 1$ angesetzt.

4.1.4 Distanzmessung bei kinematischen Anwendungen

Die aus der statischen Anwendung bekannte elektronische Distanzmessung (EDM) wird bei motorisierten Tachymetern zur Bestimmung der zeitabhängigen Entfernungsbestimmung angewendet. Bei den Leica-Instrumenten misst der koaxial integrierte Distanzmesser nach dem bekannten Phasemessprinzip [JOECKEL u. STÖBER, 1999]. Reflektorlos messende Tachymeter sind mit einer zweiten koaxialen Sendediode ausgestattet. Ein weiterer Verlauffilter optimiert auch hier den inneren Lichtweg der EDM-Messung. Der Unterschied verschiedener statischer Messmodi (Schnell-, Standard-, Präzisions- oder Long-Range-Distanzmessung) auf ein signalisiertes Ziel liegt lediglich in der Dauer der Beobachtungsreihe und deren geräteinterner Abfrage vordefinierter Genauigkeitsschranken zur berechneten Standardabweichung einer EDM-Messepoche. Die Messfrequenz im Infrarot- oder sichtbaren Bereich (Leica TCA 780 nm und TCRA 670 nm Wellenlänge) beträgt bei modernen Tachymetern mittlerweile mehr als 10000 Hz. So wird auch bei einer Messzeit von z. B. 100 ms der ausgegebene Entfernungswert aus dem Mittelwert von 1000 unabhängigen Einzelmessungen errechnet. Bei annähernd linearen Bewegungen zwischen $T_{EDM,Begin}$ und $T_{EDM,End}$ repräsentiert der aus der Integration über den EDM-Messzeitraum erhaltene Distanzwert die wahre Strecke zum bewegten Objekt im EDM-Genauigkeitsbereich.

Existiert ein inhomogener Bewegungsverlauf des Zielpunkts, so wird vom zielverfolgenden Servotachymeter eine verfälschte Distanz berechnet (vgl. Abb. 4.16 a).

Das Subsystem EDM ist die sensibelste Komponente im zielverfolgenden Servotachymeter und somit auch für die maximal mögliche Messfrequenz kinematischer Messungen verantwortlich. Oft wird durch den Lock-Modus zwar noch ein bewegtes Ziel verfolgt, das Prisma befindet sich jedoch außerhalb des EDM Wirkungsbereichs (vgl. Abb. 4.16 b) und kann so keine Distanzmessung mehr durchführen.

Entfernungsmessungen bewegter Objekte unterscheiden sich bei den Leica-Geräten in dem EDM-Mode *Rapid-Tracking* (= *Fast-Tracking*) und *Tracking*. In der Regel wird für schnelle Bewegungen der *Rapid-Tracking* Modus (kürzerer aber auch ungenauerer Messzyklus) verwendet.

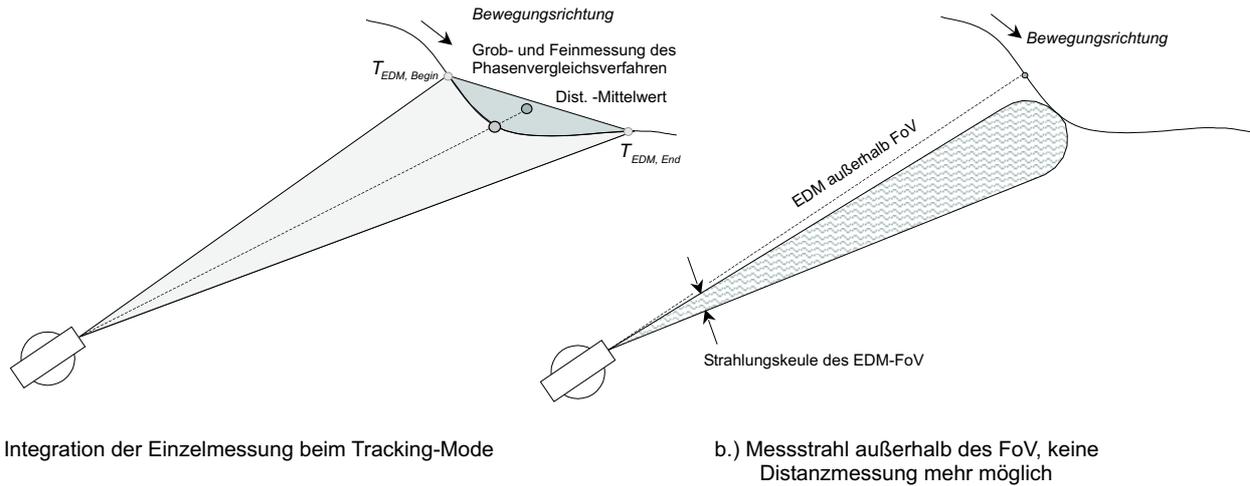


Abbildung 4.16: Zeitverhalten bei einer kinematischen EDM-Messung

Auffällig ist bei verschiedenen Geräten ein immer wiederkehrender Einlaufeffekt während der kinematischen EDM-Messung. Der Tachymeter benötigt etwa 3-5 Minuten, um konstante Entfernungen im *Rapid-Tracking*-Mode (*Tracking*-Mode identisch) auszugeben. Nach diesem Zeitraum haben die eingebauten Bauteile ihre konstante Betriebstemperatur erreicht. Die registrierten Entfernungen variieren anschließend nur noch in einem sehr geringen Band von etwa 1 mm (in diesem Beispiel existiert zusätzlich ein konstanter Nullpunktfehler von $\sim 0,7$ mm zur wahren Sollstrecke). Ein weiterer systematischer Effekt ist durch die auffällige sägezahnähnliche Funktion im Anfangsbereich erkennbar. Sowohl der Einlaufeffekt, als auch die systematischen Effekte werden durch die Untersuchungen in Abbildung (4.17) gezeigt. Ähnliche Effekte bei kinematischen Distanzmessungen wurden bereits in [INGENSAND, 2001] oder [HENNES, 1999] veröffentlicht, jedoch nicht weiter spezifiziert.

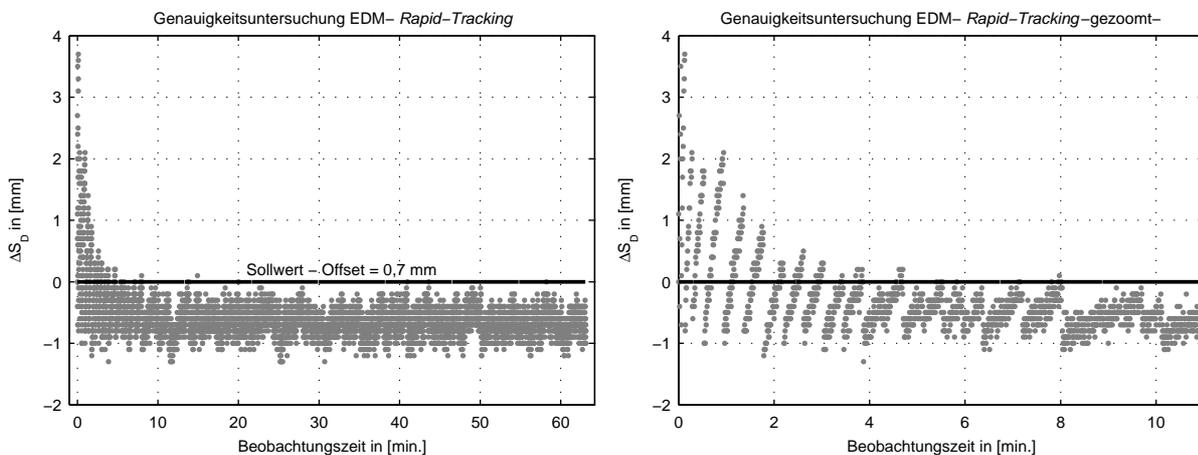


Abbildung 4.17: Genauigkeit der kinematischen Distanzmessung bei Leica TCA2003 im Tracking-Mode

Zur Vollständigkeit sind hier wiederum bekannte Fehlerquellen aus der statischen Distanzmessung wie der zyklische Phasenfehler, atmosphärische Einflüsse, Fehler der Modulationsfrequenz oder Phaseninhomogenität aufzuführen (vgl. [JOECKEL u. STOBER, 1999]).

4.2 Zeitliches Verhalten

Der zielverfolgende Servotachymeter kann wegen der einzelnen Subsysteme als hybrides Vermessungssystem bezeichnet werden. Während bei statischen, quasi-statischen oder „stop and go“ Beobachtungen die Güte der Synchronisation aller Subsysteme zeitunkritisch ist, erzeugt bei kinematischer Beobachtung eine unzureichende Synchronisation systematische Fehler. Zusätzlich ergeben die Auswertung und Ausgabe der Positionsinformationen systematische Ablagen. Es existiert immer ein physikalisch genau definierter Messzeitpunkt oder Messzeitraum der Einzelmessungen für die Richtungs- ($t_{r,i}$), Zenit- ($t_{\zeta,i}$) und Distanzmessung ($t_{D,i}$). Die Winkelmessungen können zusätzlich mit den Korrekturwerten des Kompensators abgeglichen werden, d. h. die Messzeitpunkte für $t_{radial,i}$ und $t_{tangential,i}$ müssen möglichst genau bestimmt sein. Die Berechnung, Verarbeitung und Korrektur der Rohmessdaten erfordert den Zeitbereich $\Delta t_{Cal,i}$. Als Ausgabezeitpunkt von $S_{D,i}$, r_i und ζ_i wird im selben Zeitrahmen die Zeitangabe $t_{out,i}$ verwendet (hier müssen wiederum die Parameter der Übertragungsraten und die Stringlänge berücksichtigt werden). Gilt bei kinematischen Beobachtungen mit einem zielverfolgenden Servotachymeter folgender Zusammenhang

$$t_{r,i} \neq t_{\zeta,i} \neq t_{D,i}, \quad (4.6)$$

so ergeben sich systematische Verfälschungen in der Trajektorie. An **zwei ausgewählten Beispielen** einer linearen (Beobachtung einer Schiffstrajektorie an einem Donauabschnitt in der Nähe von Deggendorf [CZAJA, et al., 2001], Lageplot Hinbewegung Abb. 4.18 links und Lageplot Rückbewegung Abb. 4.18 rechts) und einer kreisförmigen Bewegung (Bewegungssimulator vgl. Abb. 4.24 Mitte, Lageplot Abb. 4.20 links, orthogonale Ablagevektoren im und gegen den Uhrzeigersinn Abb. 4.20 rechts, Entfernung Instrument-Kreismittelpunkt 6,19 m) wird dieser Fehler in Bezug zur geometrischen Anordnung (vgl. Abb. 4.2) für diese beiden Messanordnungen visualisiert.

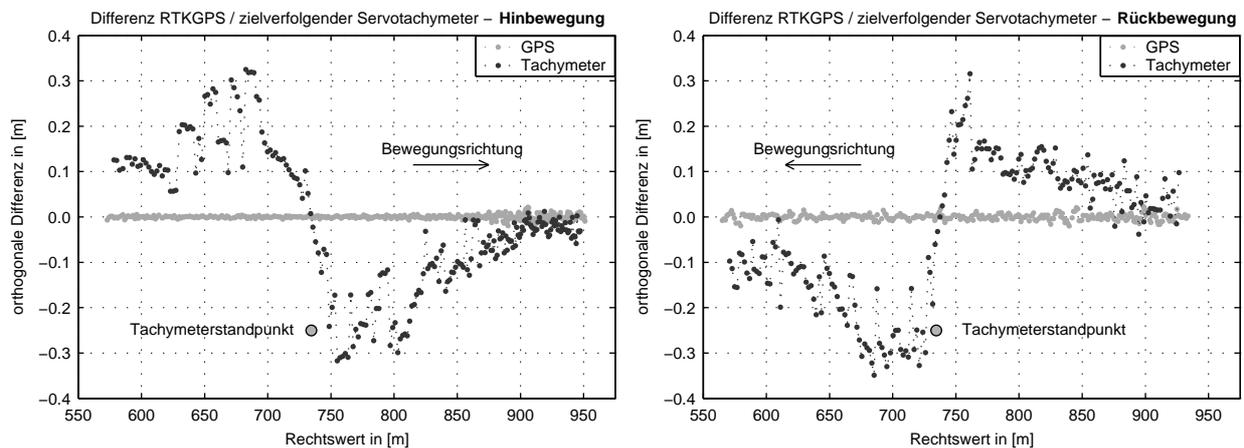


Abbildung 4.18: systematischer Positionsfehler durch unzureichende Synchronisation der Subsysteme - linear

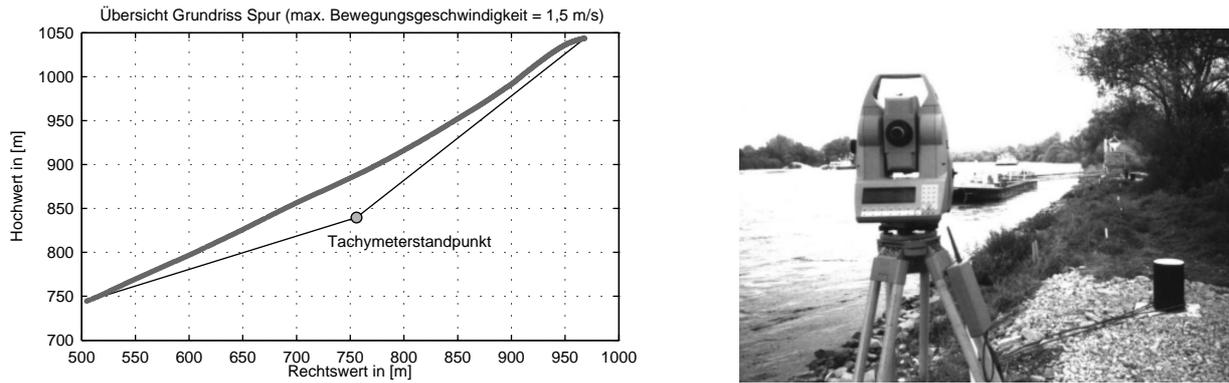


Abbildung 4.19: Messanordnung und Bewegungsspur der Abbildung (4.18)

Die Auswahl des Instrumentenstandpunkts war wegen der geometrischen Anordnung und dichter Baumreihen nur an wenigen Positionen möglich.

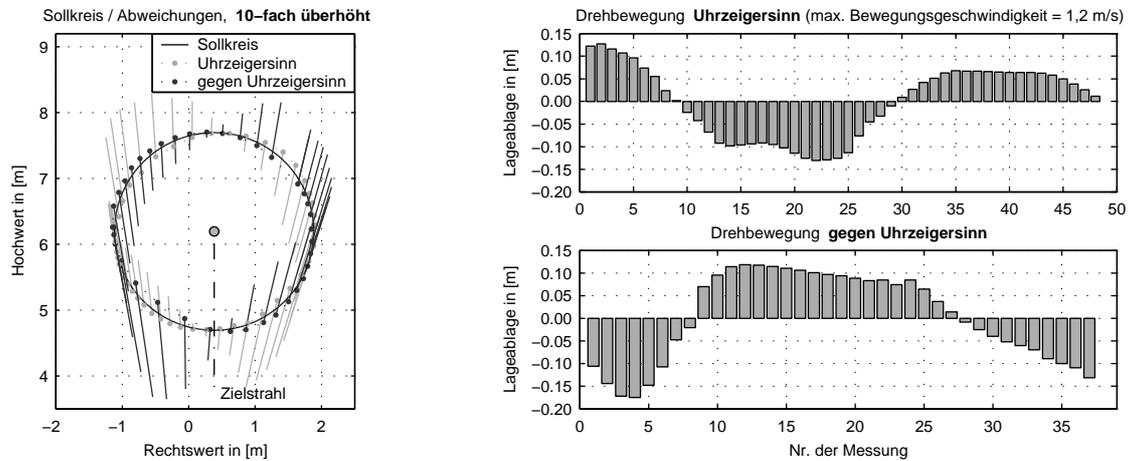


Abbildung 4.20: systematischer Positionsfehler durch unzureichende Synchronisation der Subsysteme - kreisförmig

Die oberen zwei Abbildungen zeigen systematische Fehler einer Bewegung des 360°-Reflektors im Uhrzeigersinn und gegen den Uhrzeigersinn an einem geometrisch bekannten Sollkreis. Die unteren beiden Abbildungen resultieren aus dem Vergleich von RTKGPS (Leica Empfänger SR399) zu Tachymetermessungen. Gegenläufige Bewegungen ergeben hier den gespiegelten Effekt. In beiden Darstellungen wurden die terrestrischen Messungen mit dem zielverfolgenden Servotachymeter TCA2003 von Leica (Registrierung mit einer GeoBasic on-board Applikation) durchgeführt. Die Ursache dieser systematischen Verteilung der Ablagevektoren ist durch eine unzureichende Synchronisation der Distanz- und Winkelmessung begründet. Wenn der Zusammenhang des Ansatzes (Gleichung 4.6) gilt, dann existiert eine Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000] zwischen der Distanz- und Richtungsmessung aus

$$\Delta t_{D,r} = t_D - t_r. \quad (4.7)$$

Hier gilt gemäß der Definition, dass bei einem positiven Vorzeichen von $\Delta t_{D,r}$ die Distanzmessung zeitlich vor der Winkelmessung liegt und bei einem negativen Vorzeichen von $\Delta t_{D,r}$ die Winkelmessung von der Distanzmessung stattfindet (abhängig von der Instrumentenkonfiguration). In einer praktischen Messanordnung äußert sich in Abhängigkeit der Messanordnung, der Bewegungsart, -richtung und -geschwindigkeit die Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ wie folgt.

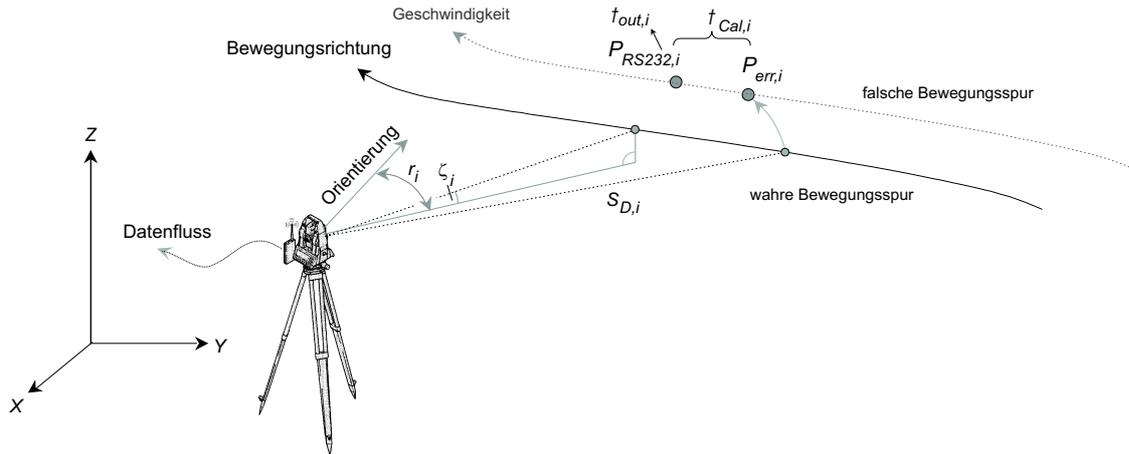


Abbildung 4.21: systematischer Positionsfehler horizontaler Bewegungen wegen der Latenzzeit $\Delta t_{D,r} \neq 0$

Als Anhaltspunkt terrestrischer Messungen mit zielverfolgenden Servotachymetern kann der zu erwartende Fehler wiederum aus $\Delta t_{D,r}$ im Zusammenhang mit der Abbildung (1.1) abgeschätzt werden. Hierzu ist jedoch die Kenntnis der Latenzzeit nach Größe und Verhalten erforderlich. Da $t_{r,i}$ und $t_{z,i}$ aus derselben Bildszenen und einem identisch verlaufenden Prozess des horizontalen und vertikalen Teilkreisabgriffs resultieren, ist hier der Zeitunterschied ($t_{r,i} - t_{z,i} \approx 0$) $\Delta t_{r,z}$ vernachlässigbar klein. Untersuchungen an vertikalen Bewegungen ergaben keine signifikanten Abweichungen im Auflösereich der Richtungs- und Zenitwinkelmessung. Außerdem verursachen Messsignaldetektion, Berechnungs- und Auswertungszeit sowie die Speicherung der Beobachtungen im Datenpool und die nachfolgende Ausgabe auf die RS232-Schnittstelle eine zusätzliche Totzeit $\Delta t_{RS232,i}$. Eine Registrierung der Beobachtungen auf einer PC-Speicherkarte im Tachymeter ist wegen dem fehlenden Präzisionszeitstempel nicht geeignet. D. h. bei der fehlerfreien Auswertung einer Messepoche ϵ_i müssen die jeweiligen Zeitpunkte $t_{D,i}$, $t_{r,i}$, $t_{z,i}$, $t_{T,i}$, $t_{Cal,i}$ und $t_{RS232,i}$ bekannt sein und in der Positionsrechnung berücksichtigt werden. Dies wird auch bei der Betrachtung der Übersicht (Tab. 1.1) deutlich.

Je nach Messanordnung, Bewegungsgeschwindigkeit, Instrument und Konfiguration erzeugt diese Latenzzeit unterschiedliche Fehler in der beobachteten Bewegungsspur. So geht der Positionsfehler der Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ mit einem Winkel zwischen der Bewegungsspur und der Ziellinie des Tachymeters von etwa 90° (Abb. 4.22 a) oder etwa 0° (Abb. 4.22 c) vollständig in der geometrischen Anordnung, d. h. in der Bewegungsspur unter. Beträgt die Anzielung (wiederum der Winkel zwischen der Bewegungsspur und der Ziellinie des Tachymeters) etwa 45° bzw. 135° (Abb. 4.22 b), so erzeugt $t_{D,r}$ hier eine maximale Abweichung in der berechneten Trajektorie.

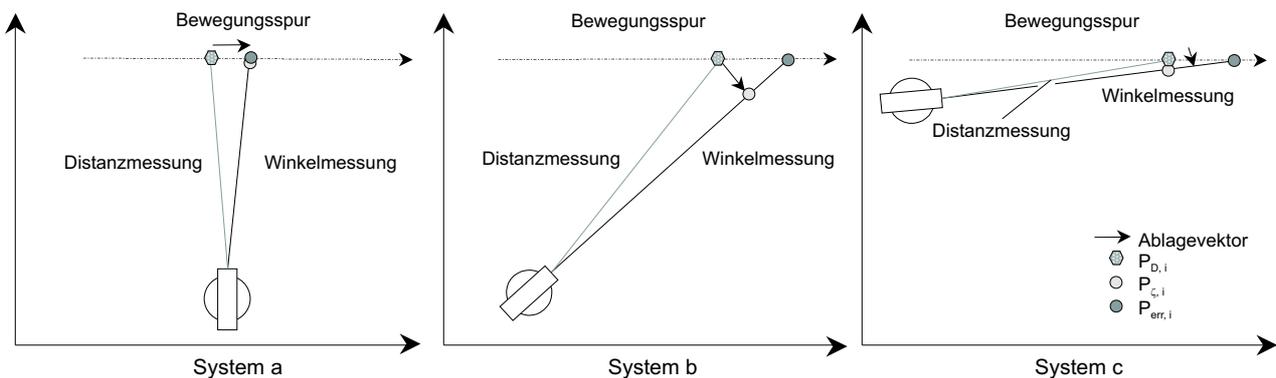


Abbildung 4.22: Auswirkung des Zeitoffsets bei verschiedenen geometrischen Anordnungen

4.2.1 Funktionale Beziehung

Zur mathematischen Beschreibung des Zusammenhangs von $\Delta t_{D,r}$ wird die Messepoche ϵ_i in einem dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem durch $S(Y, X, Z)$ dargestellt. Der Standpunkt des zielverfol-

genden Servotachymeters wird als $P_{TPS}(Y_{TPS}, X_{TPS}, Z_{TPS})$, der Ort des Zielpunkts zum Zeitpunkt $t_{D,i}$ mit $P_{D,i}(Y_{D,i}, X_{D,i}, Z_{D,i})$ sowie $P_{r,i}(Y_{r,i}, X_{r,i}, Z_{r,i})$ als der Zielpunkt der Richtungsmessung zum Zeitpunkt $t_{r,i}$ bezeichnet.

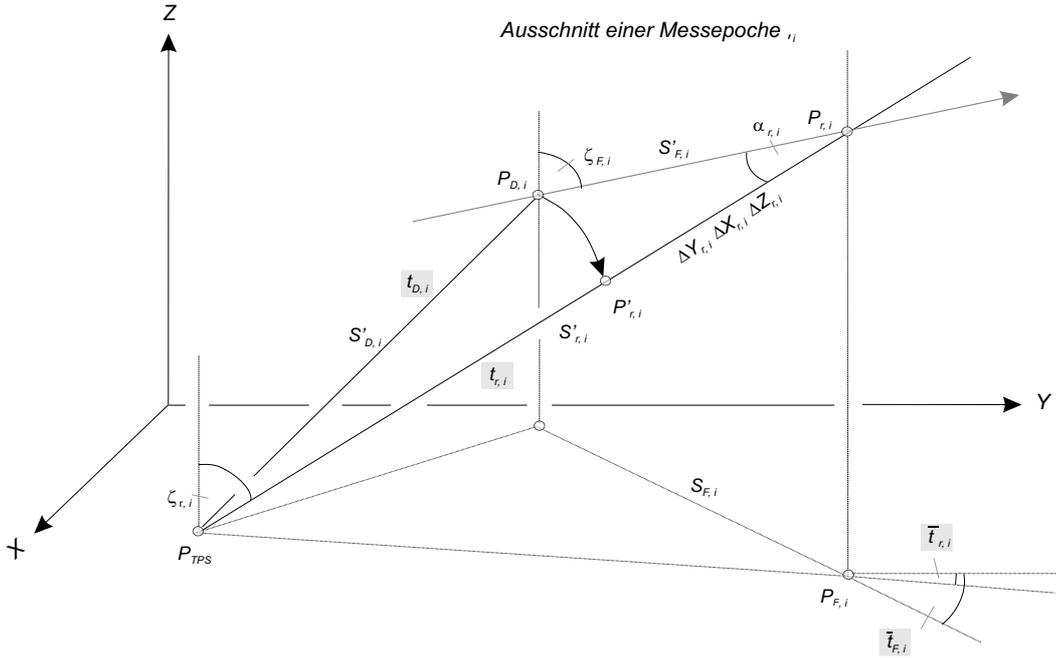


Abbildung 4.23: Messepoche einer nichtsynchronisierten Winkel- und Distanzmessung

Mit dem Geschwindigkeitsvektor $v_{F,i}$ des Zielpunkts zum Zeitpunkt t_i gilt für seinen räumlichen Fahrweg $S'_{F,i}$ während der Zeit $\Delta t_{D,r}$

$$S'_{F,i} = v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r}, \quad (4.8)$$

oder anders geschrieben mit den unbekanntem Koordinaten $P_{D,i}$ und $P_{r,i}$

$$S'_{F,i} = \sqrt{(Y_{r,i} - Y_{D,i})^2 + (X_{r,i} - X_{D,i})^2 + (Z_{r,i} - Z_{D,i})^2} = \sqrt{\Delta Y_i^2 + \Delta X_i^2 + \Delta Z_i^2} \quad (4.9)$$

bzw. im Grundriss als Horizontalspur (ohne Z-Komponente) durch

$$S'_{F,i} = \sqrt{(Y_{r,i} - Y_{D,i})^2 + (X_{r,i} - X_{D,i})^2}. \quad (4.10)$$

Für die Bestimmung des Richtungswinkels $\bar{t}_{F,i}$ und des Zenitwinkels $\zeta_{F,i}$ wird der Ansatz

$$\begin{aligned} \bar{t}_{F,i} &= \arctan\left(\frac{\Delta X_i}{\Delta Y_i}\right) = \arccos\left(\frac{\Delta Y_i}{S'_{F,i}}\right) = \arcsin\left(\frac{\Delta X_i}{S'_{F,i}}\right), \\ \zeta_{F,i} &= \arctan\left(\frac{S'_{F,i}}{\Delta Z_i}\right) = \arccos\left(\frac{\Delta Z_i}{S'_{F,i}}\right) = \arcsin\left(\frac{S'_{F,i}}{S'_{F,i}}\right). \end{aligned} \quad (4.11)$$

gewählt. Als Beobachtungsgröße des zielverfolgenden Servotachymeters stehen die Größen $\bar{t}_{F,i}$ (Richtungswinkel im orientierten Messsystem), Zenitwinkel $\zeta_{F,i}$ und der Schrägdistanz $S'_{D,i}$ zur Epoche ϵ_i zur Verfügung. Die wegen $\Delta t_{D,r}$ verfälschte Position $P'_{r,i}$ errechnet sich durch die polare Punktbestimmung aus

$$\begin{aligned}
\hat{Y}_{r,i} &= Y_{TPS} + S'_{D,i} \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}), \\
\hat{X}_{r,i} &= X_{TPS} + S'_{D,i} \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \sin(\bar{t}_{r,i}), \\
\hat{Z}_{r,i} &= Z_{TPS} + S'_{D,i} \cdot \cos(\zeta_{r,i}).
\end{aligned} \tag{4.12}$$

Die gesuchte Position $P_{r,i}$ ergibt sich aus den Ansatz

$$\begin{aligned}
Y_{r,i} &= Y_{TPS} + S'_{r,i} \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}), \\
X_{r,i} &= X_{TPS} + S'_{r,i} \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \sin(\bar{t}_{r,i}), \\
Z_{r,i} &= Z_{TPS} + S'_{r,i} \cdot \cos(\zeta_{r,i})
\end{aligned} \tag{4.13}$$

oder durch den Koordinatenzuschlag $\Delta P_{r,i}(\Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i})$ mit

$$\begin{aligned}
Y_{r,i} &= \hat{Y}_{r,i} + (S'_{r,i} - S'_{D,i}) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}), \\
X_{r,i} &= \hat{X}_{r,i} + (S'_{r,i} - S'_{D,i}) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \sin(\bar{t}_{r,i}), \\
Z_{r,i} &= \hat{Z}_{r,i} + (S'_{r,i} - S'_{D,i}) \cdot \cos(\zeta_{r,i}),
\end{aligned} \tag{4.14}$$

wobei die Distanz $S'_{r,i}$ nicht direkt messbar ist. Nun gilt im Raumdreieck der drei Punkte P_{TPS} , $P_{D,i}$ und $P_{r,i}$ der Kosinussatz mit

$$S'_{D,i} = \sqrt{S'^2_{r,i} + S'^2_{F,i} - 2 \cdot S'_{r,i} \cdot S'_{F,i} \cdot \cos(\alpha_{r,i})}. \tag{4.15}$$

Der Zwischenwinkel $\alpha_{r,i}$ kann mit dem Winkelkosinussatz

$$\cos(\alpha_{r,i}) = \cos(\zeta_{F,i}) \cdot \cos(\zeta_{r,i}) + \sin(\zeta_{F,i}) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{F,i} - \bar{t}_{r,i}) \tag{4.16}$$

berechnet werden. Durch Auflösen der Gleichung (4.15) wird die unbekannte Distanz aus

$$S'_{r,i} = S'_{F,i} \cdot \cos(\alpha_{r,i}) \pm \sqrt{S'^2_{D,i} + S'^2_{F,i} \cdot (1 - \cos^2(\alpha_{r,i}))} \tag{4.17}$$

bestimmt. Die Lösung der Gleichung mit dem negativen Vorzeichen der Wurzel ist hier ohne Bedeutung. In der Regel ist $S'_{F,i} \ll S'_{D,i}$, so dass die Wurzel in eine Reihe entwickelt werden kann. Mit dem ersten Glied der Reihe folgt aus

$$S'_{r,i} - S'_{D,i} = S'_{F,i} \cdot \cos \alpha_{r,i} - \frac{1}{2} \frac{S'^2_{F,i}}{S'^2_{D,i}} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \tag{4.18}$$

ausreichend genau die gesuchte Größe. Somit ist man in der Lage, den gesuchten Punkt $P_{r,i}$ der Richtungsbeobachtung durch die Verbesserungen $\Delta P_{r,i}(\Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i})$ aus

$$\begin{aligned}
Y_{r,i} &= \hat{Y}_{r,i} + v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r} \cdot \left(\cos(\alpha_{r,i}) - \frac{1}{2} \frac{v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r}}{S'_{D,i}} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right) \cdot \sin \zeta_{r,i} \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}), \\
X_{r,i} &= \hat{X}_{r,i} + v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r} \cdot \left(\cos(\alpha_{r,i}) - \frac{1}{2} \frac{v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r}}{S'_{D,i}} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \sin(\bar{t}_{r,i}), \\
Z_{r,i} &= \hat{Z}_{r,i} + v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r} \cdot \left(\cos(\alpha_{r,i}) - \frac{1}{2} \frac{v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r}}{S'_{D,i}} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right) \cdot \cos(\zeta_{r,i})
\end{aligned} \tag{4.19}$$

endgültig zu berechnen.

Korrektur fehlerhafter Messungen bewegter Ziele

Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsvektors $v_{F,i}$ und des Richtungswinkels $\bar{t}_{F,i}$ können einfach drei aufeinanderfolgende angemessene Punkte P_{i-1} , P_i und P_{i+1} der Trajektorie betrachtet werden. Der Algorithmus konvergiert in der Regel nach wenigen rekursiven Berechnungsschritten. In der ersten Näherung werden zur Berechnung die fehlerhaft berechneten Koordinaten verwendet. So folgt für den Richtungswinkel im Punkt $P_{r,i}$

$$\tan(\bar{t}_{F,i}) = \frac{\hat{X}_{r,i+1} - \hat{X}_{r,i-1}}{\hat{Y}_{r,i+1} - \hat{Y}_{r,i-1}} \tag{4.20}$$

sowie für die Bestimmung der Geschwindigkeit

$$v_{F,i} = \frac{\Delta l_{i+1} - \Delta l_i}{t_{r,i+1} - t_{r,i-1}}. \tag{4.21}$$

Die dreidimensionalen Punktabstände folgen aus

$$\Delta l_i = \sqrt{(\hat{Y}_{r,i} - \hat{Y}_{r,i-1})^2 + (\hat{X}_{r,i} - \hat{X}_{r,i-1})^2 + (\hat{Z}_{r,i} - \hat{Z}_{r,i-1})^2}. \tag{4.22}$$

Die in Abbildung (1.1) dargestellte Fehlerabschätzung beschreibt die Beziehung zwischen dem fehlerhaften Punktversatz auf der Geraden $\overline{P_{TPS} P_{r,i}}$, der Latenzzeit zwischen der Richtungs- und Distanzmessung und der Bewegungsgeschwindigkeit des Zielpunkts. Durch die Verwendung der ersten Gleichung des Ansatzes von (4.19) erhält man für $\zeta_{r,i} = 100$ gon und $\hat{t}_{r,i} = 0$ gon mit der Gleichung

$$Y_{r,i} - \hat{Y}_{r,i} = \Delta Y_{r,i} = v_{F,i} \cdot \Delta t_{D,r} \tag{4.23}$$

eine Funktion zwischen zusammengehörigen Grenzwerten.

4.2.2 Verfahren zur Bestimmung der Latenzzeit

Neben der separaten Betrachtung der Funktionalität und Messgenauigkeit der ATR, Winkel- und Distanzmessung ist die Leistungsfähigkeit und Qualität des Gesamtsystems während der kinematischen Beobachtung zu verifizieren [HENNES, 1999]. Hierbei ist zwischen einem Vergleichsverfahren (zielverfolgender Servotachymeter zum RTKGPS- evtl. mit INS-Stützung) oder Beobachtungen an einer geometrisch bekannten Solltrajektorie als Referenzinformation zu unterscheiden. Unkorrigierte Messungen mit dem zielverfolgenden Servotachymeter ergeben systematische Abweichungen aus einer unzureichenden Synchronisation der Subsysteme (vgl. Abb. 4.18). Im Geodätischen Prüflabor des Lehrstuhls für Geodäsie stehen hier eine Modellbahn (Abb. 4.24 links, Führungsgenauigkeit $\pm 1 - 2$ mm), ein Industrieroboter (Abb. 4.24 Mitte, Führungsgenauigkeit kleiner 0,5 mm) und eine Hommelbank (Abb. 4.24 rechts, 3 m Länge, Führungsgenauigkeit $\pm 0,1 - 0,2$ mm) als Bewegungssimulatoren zur Verfügung.



Abbildung 4.24: Bewegungssimulatoren des Geodätischen Prüflabors

Die optimale Anordnung zur Bestimmung der Latenzzeit ergibt sich aus einem linearen Versuchsaufbau mit der Verwendung eines Präzisionsprismas (Minimierung des Prismenfehlers). So ergeben sich z. B. bei Messungen an der linearen Hommelbank (Grundrisssskizze Abb. 4.25 links, Profil der Bewegungsgeschwindigkeit vgl. Abb. 4.26 links) mit einem Winkel zwischen der Bewegungsrichtung und dem Zielstrahl von $\sim 45^\circ$ folgende unkorrigierte Beobachtungen (Abb. 4.25 rechts). Der Synchronisationsfehler kommt hier wegen der geometrischen Anordnung maximal zur Geltung (Begründung siehe hierzu Abb. 4.2). Die Reihenfolge der Richtungs- und Distanzmessung in Instrument ist bei der Anwendung des Kalibrierungsverfahrens unerheblich.

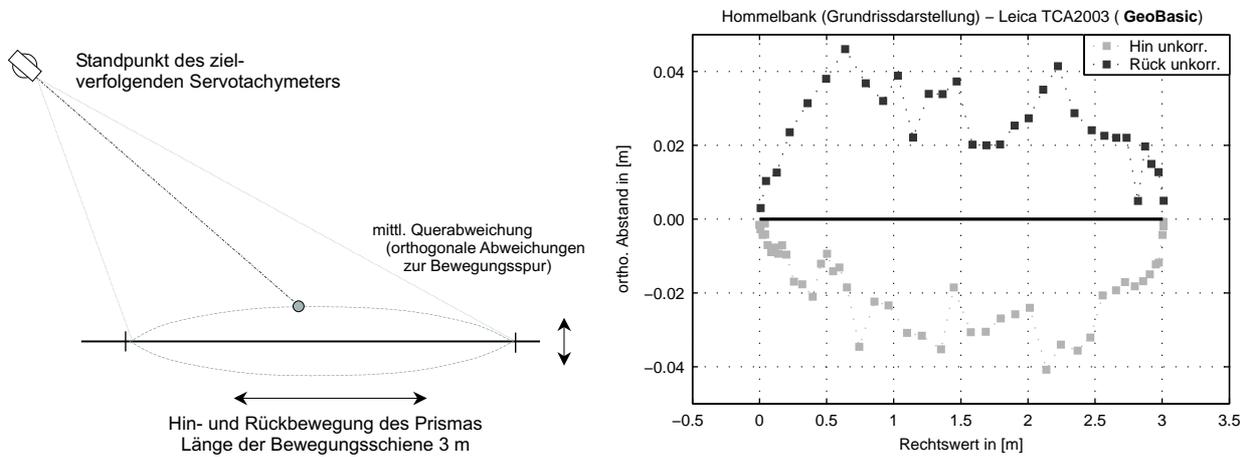


Abbildung 4.25: Messanordnung und unkorrigierte Spur zur Bestimmung von $t_{D,r}$ an der Hommelbank

Zur Korrektur der fehlerhaften Rohmessungen mit der Formel (4.19) muss die Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ zwischen der Richtungs- und Distanzmessung bekannt sein. Aus der aufgeführten Kalibrierungsanordnung kinematischer Beobachtungen ergibt sich aus der Gleichung (4.14) durch $\alpha_{r,i}^H = \alpha_{r,i}^R \pm 200$ gon ein Vorzeichenwechsel in $\cos(\alpha_{r,i})$. Nun wird unter der Annahme, dass $P_{r,i}^H = P_{r,i}^R$ (Position der Richtungsmessung aus Hin- und Rückbewegung) ist, die Gleichung

$$\begin{aligned}
 Y_{r,i} &= \hat{Y}_{r,i}^H + v_{F,i}^H \cdot \Delta t_{D,r} \cdot \left(\cos(\alpha_{r,i}) - \frac{1}{2} \frac{v_{F,i}^H \cdot \Delta t_{D,r}}{S_{D,i}^H} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}), \\
 Y_{r,i} &= \hat{Y}_{r,i}^R + v_{F,i}^R \cdot \Delta t_{D,r} \cdot \left(\cos(\alpha_{r,i}) - \frac{1}{2} \frac{v_{F,i}^R \cdot \Delta t_{D,r}}{S_{D,i}^R} \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right) \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i})
 \end{aligned} \quad (4.24)$$

angesetzt. Aus der Differenz der gemessenen Abszissen kann

$$\hat{Y}_{r,i}^H - \hat{Y}_{r,i}^R = \Delta t_{D,r} \cdot \left[(v_{F,i}^H - v_{F,i}^R) \cdot \cos(\alpha_{r,i}) - \frac{\Delta t_{D,r}}{2} \cdot \left(\frac{(v_{F,i}^H)^2}{S_{D,i}^H} - \frac{(v_{F,i}^R)^2}{S_{D,i}^R} \right) \cdot \sin^2(\alpha_{r,i}) \right] \cdot \sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i}) \quad (4.25)$$

geschrieben werden (Variablenbezeichnung siehe Abb. 4.23). Eine wichtige Voraussetzung des Kalibrierungsverfahrens ist, dass die Bewegungsgeschwindigkeit des Prismas konstant und $v_{F,i}^H = v_{F,i}^R = v_{F,i}$ ist. Dadurch gilt $v_{F,i}^H - v_{F,i}^R \sim 0$. Eine spezielle Bewegungsform muss bei diesem Verfahren nicht berücksichtigt werden. Die konstante Geschwindigkeit des Prismas ist bei der Hommelbank und den Drehbewegungen am Industrieroboter durch die Antriebsmotoren gegeben. Somit folgt aus dem verbleibenden Term der rechteckigen Klammer

$$\begin{aligned}\Delta t_{D,r} &= \frac{1}{2 \cdot v_{F,i} \cdot \cos(\alpha_{r,i})} \cdot \frac{\hat{Y}_{r,i}^H - \hat{Y}_{r,i}^R}{\sin(\zeta_{r,i}) \cdot \cos(\bar{t}_{r,i})}, \\ \Delta t_{D,r} &= \frac{1}{2 \cdot v_{F,i} \cdot \cos(\alpha_{r,i})} \cdot \frac{\hat{X}_{r,i}^H - \hat{X}_{r,i}^R}{\sin(\zeta_{r,i}) \cdot \sin(\bar{t}_{r,i})} \\ \Delta t_{D,r} &= \frac{1}{2 \cdot v_{F,i} \cdot \cos(\alpha_{r,i})} \cdot \frac{\hat{Z}_{r,i}^H - \hat{Z}_{r,i}^R}{\cos(\zeta_{r,i})}.\end{aligned}\quad (4.26)$$

Man hat technisch keine Möglichkeit, einen lagemäßig gleichen Punkt in Hin- und Rückfahrt identisch zu messen. Durch eine geeignete Anordnung des lokalen Systems mit der Abszissenachse in Bewegungsrichtung und der Ordinatenachse als orthogonale Abweichung ergibt sich der Vorteil, dass alle Sollwerte von $P(x_{r,i}) = 0$ sind. Die Ablagen von $P(x_{r,i}^H)$ und $P(x_{r,i}^R)$ ordnen sich symmetrisch an (siehe Abb. 4.25 rechts). Nach wenigen Iterationsschritten konvergiert der Algorithmus im Rahmen der Messgenauigkeit der Winkel- und Distanzmessung. Die korrigierten Beobachtungen sind anschließend nicht mehr systematisch verfälscht, sondern verteilen sich entlang der Abszissenachse. Die um $\Delta t_{D,r}$ korrigierten Tachymeterbeobachtungen sind der Abbildung (4.26 links) zu entnehmen. Die für den Korrekturalgorithmus notwendige Information der Bewegungsgeschwindigkeit wurde aus den geglätteten Rohdaten entnommen (vgl. Abb. (4.26 rechts). Bei der Verwendung einer fehlerhaften Geschwindigkeit wird die Bestimmung von $\Delta t_{D,r}$ falsch (z. B. ergibt ein $\delta v = 0,001$ m/s einen maximalen Fehler von 1 ms in $\Delta t_{D,r}$).

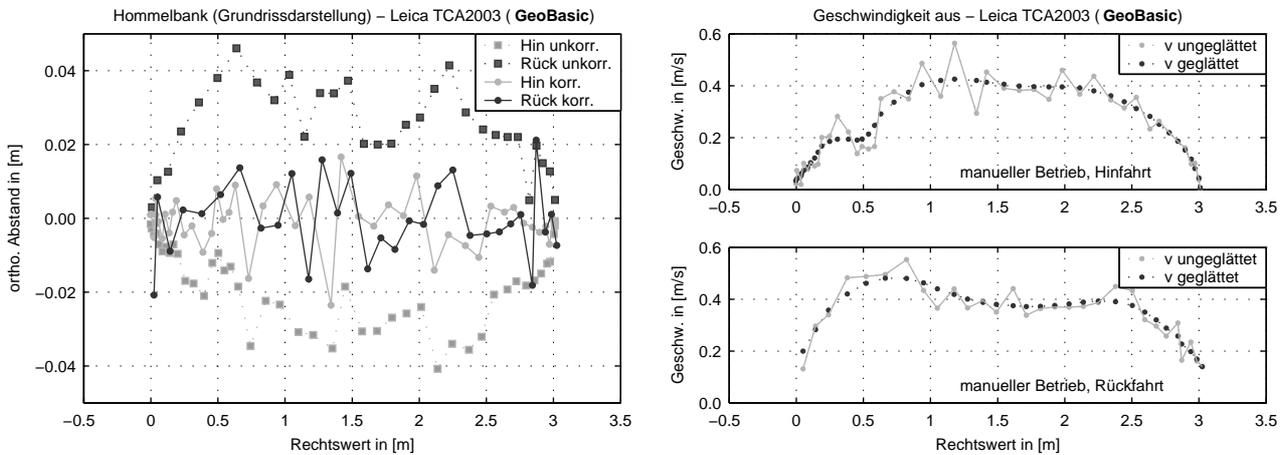


Abbildung 4.26: korrigierte Tachymeterbeobachtungen / Bewegungsgeschwindigkeit - Hommelbank

Ist $\Delta t_{D,r}$ bekannt und existiert eine Geschwindigkeitsinformation (v geglättet aus der ungenauen Zeitinformation der Tachymeteruhr, ist ausreichend), so kann mit diesem Verfahren jede beliebige Bewegungsspur hinsichtlich der unzureichenden Synchronisation der Subsysteme korrigiert werden. An den beiden nachfolgenden Beispielen einer linearen und kreisförmigen Zielpunktbewegung sind die um $\Delta t_{D,r}$ korrigierten Positionen im Vergleich zu den beiden unkorrigierten Positionsplots (Abb. 4.18 unten links und Abb. 4.18) oben links abgebildet. Der Einfluss einer Geschwindigkeitsänderung auf die Kalibrierung ist in Abbildung 1.2 dargestellt.

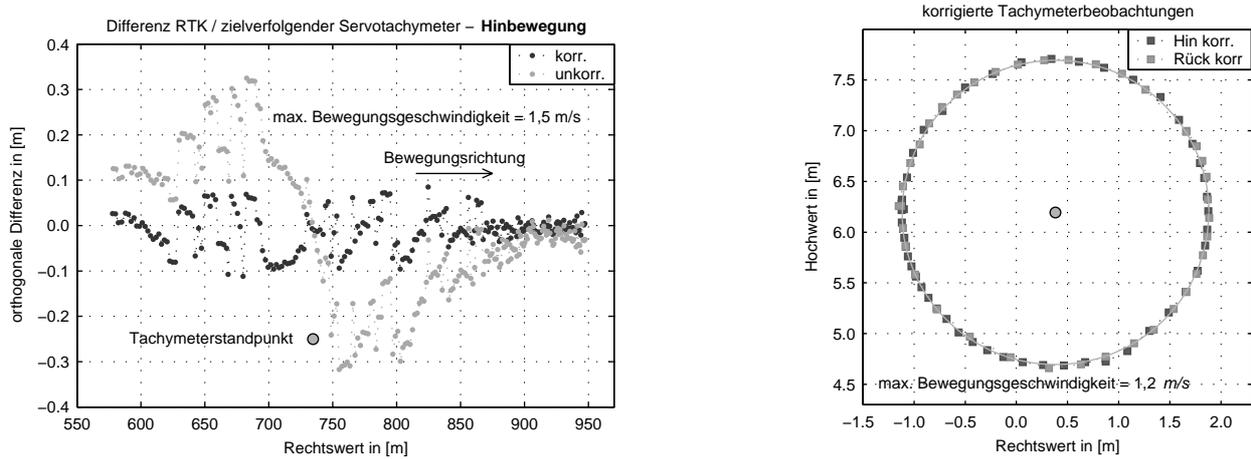


Abbildung 4.27: korrigierte Tachymeterbeobachtungen beliebiger Bewegungsformen (Leica TCA2003, GeoBasic)

Verschiedene zielverfolgende Servotachymeter (mehrere Instrumente der Fa. Leica Geosystems und ein Instrument der Firma Geotronics) wurden im Labor hinsichtlich der Güte der Synchronisation kalibriert. Die Werte der Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ sind ebenso wie bei den kinematischen Messungen mit GPS abhängig von der Gerätekonfiguration und dem Messprogramm. Die Ergebnisse wurden aus mehreren Wiederholungsmessungen zusammengefasst. Die beschränkte Länge des Bewegungssimulators ermöglicht jedoch keine Interpretation zusätzlicher Effekte.

Instrument	EDM-Mode u. Registrierungssoftware	Kompensator	$\Delta t_{D,r}$ in [ms]
Leica TCA2003	Tracking, GeoBasic (<i>AutoRecord</i>)	Komp. ein	+ 285
	Tracking, GeoBasic (<i>AutoRecord</i>)	Komp. aus	+ 243
	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>AutoRecord</i>)	Komp. ein	- 116
	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>AutoRecord</i>)	Komp. aus	- 103
Leica TCRA1101	Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. ein	+ 230
	Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. aus	+ 112
	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. ein	+ 200
	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. aus	+ 91
Leica TCRA1103 (<i>plus Version</i>)	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. ein	+ 155
	Fast-Tracking, GeoBasic (<i>FastRecord</i>)	Komp. aus	+ 80
Geodimeter <i>ATS-PT</i>	Tracking (<i>on-board-Registrierung</i>)	Komp. ein	+ 232

Tabelle 4.1: Bestimmung der Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ an der Hommelbank des Geodätischen Prüflabors

Genauere Betrachtung der Latenzzeit

Durch das dargestellte Verfahren zur Bestimmung und Korrektur kinematischer Beobachtungen mit dem zielverfolgenden Servotachymeter wird lediglich der systematische Anteil 1. Ordnung eliminiert. Betrachtet man Beobachtungen an längeren Referenzbewegungen, so können bei einzelnen Geräten verschiedene Niveaus j von $\Delta t_{D,r,j}$ existieren. Aus den Messgrößen des zielverfolgenden Servotachymeter r_i , ζ_i und $S_{D,i}$ und den RTKGPS-Koordinaten mit präziser UTC-Zeitinformation kann in einem Feldverfahren die Verteilung von $\Delta t_{D,r,j}$ verifiziert werden. Hierzu wurden beide Sensoren an einem Fahrzeug montiert und unter Berücksichtigung der Zielpunktsexzentrizitäten die jeweilige Trajektorie geplottet (siehe Abb. 4.28 links und einen Detailausschnitt rechts).

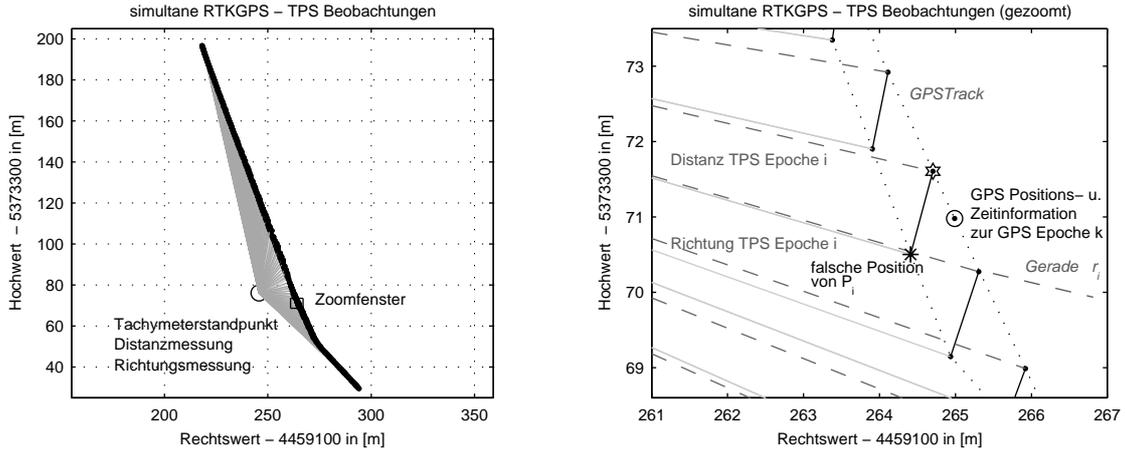


Abbildung 4.28: Trajektorie aus dem Leica RTKGPS SR530 und dem Leica TCA2003 (Untersuchungen im FAM-Projekt)

Durch den vereinfachten zweidimensionalen Ansatz (Grundrissebene) der beiden Geraden $r_i \cap GPSTrack_k$ aus

$$f_1(\tilde{Y}_{1,k}) : \tilde{X}_{r,k} = \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot \tilde{Y}_{r,k} + \tilde{X}_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k}$$

$$f_2(\tilde{Y}_{2,i}) : \tilde{X}_{r,i} = \left(\frac{X_{r,i} - X_{TPS}}{Y_{r,i} - Y_{TPS}} \right) \cdot \tilde{Y}_{r,i} + \tilde{X}_{r,i} - \left(\frac{X_{r,i} - X_{TPS}}{Y_{r,i} - Y_{TPS}} \right) \cdot Y_{r,i} \quad (4.27)$$

mit

$$P_{r,i}(X_{r,i}, Y_{r,i}) = \text{Position der Richtungsmessung zur Epoche } i \text{ auf der Trajektorie u.}$$

$$P_{GPS,k}(X_{GPS,k}, Y_{GPS,k}) = \text{GPS-Position zur Epoche } k$$

kann die unbekannte Zeitmarke $t_{r,i}$ jeder Richtungsmessung aus den bekannten GPS-Beobachtungen mit präziser Zeitinformation abgeleitet werden. Bei einem dreidimensionalen Ansatz ist hier der Schnittpunkt oder der kürzeste Abstand zweier windschiefer Geraden zu berechnen. Die Elemente der Geraden $f_1(k)$ sind hier vollständig aus den transformierten GPS-Koordinaten bekannt. Es bietet sich an, die WGS84-Positionen in ein ebenes lokales oder Landessystem (im Beispiel Gauss-Krüger System) zu transformieren. Der unbekannte Punkt der Richtungsmessung im GPS-Zeitsystem (gesuchter Zeitpunkt) $\tilde{P}_{r,i}(\tilde{X}_{r,i}, \tilde{Y}_{r,i})$ wird durch den Ansatz

$$\tilde{Y}_{r,k} = \tilde{Y}_{r,i},$$

$$\tilde{X}_{r,k} = \tilde{X}_{r,i} \quad (4.28)$$

mit der Gleichung

$$\tilde{X}_{r,i} = \frac{\left[X_{r,i} - \left(\frac{X_{r,i} - X_{TPS}}{Y_{r,i} - Y_{TPS}} \right) \cdot Y_{r,i} - X_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \right]}{\left[\left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) - \left(\frac{X_{r,i} - X_{TPS}}{Y_{r,i} - Y_{TPS}} \right) \right]},$$

$$\tilde{Y}_{r,i} = \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot \tilde{X}_{r,i} + X_{r,i} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \quad (4.29)$$

errechnet. Durch diese Gleichung kann der genaue Zeitpunkt der Richtungsmessung im GPS-Zeitrahmen bestimmt werden. Hierbei wirkt sich die Art der Bewegung nicht auf die Bestimmung aus, wenn die Messfrequenz der beiden Messsensoren ausreichend hoch ist (Diskretisierungsfehler).

Die *UTC-Zeitmarke* $t_{D,i}$ der Distanzmessung resultiert aus $S_{D,i} \cap GPSTrack_k$ (ebenfalls auf die Grundrissebene beschränkt, d. h. Trennung nach Lage- und ggf. nach der Höhenkomponente zur Interpretation der Untersuchungsergebnisse, sonst müsste ein Schnitt einer Geraden im Raum mit einer „Distanz“-Kugel angesetzt werden) mit

$$D_i^2 = (\tilde{X}_{D,i} - X_{TPS})^2 - (\tilde{Y}_{D,i} - Y_{TPS})^2,$$

$$f(3, \tilde{Y}_{3,k}) : \tilde{X}_{D,k} = \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot \tilde{Y}_{D,k} + \tilde{X}_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \quad (4.30)$$

mit

$$P_{D,i}(X_{D,i}, Y_{D,i}) = \text{Position der Distanzmessung zur Epoche } i \text{ auf der Trajektorie und}$$

und wiederum

$$\begin{aligned} \tilde{Y}_{D,k} &= \tilde{Y}_{D,i}, \\ \tilde{X}_{D,k} &= \tilde{X}_{D,i}. \end{aligned} \quad (4.31)$$

Durch das Einsetzen der Formeln ergibt sich die quadratische Gleichung

$$\begin{aligned} D_i^2 &= \tilde{X}_{D,i}^2 - 2 \cdot \tilde{X}_{D,i} \cdot X_{TPS} + X_{TPS}^2 \cdot \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right)^2 \cdot X_{D,i}^2 + 2 \cdot \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot \\ &\left[X_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \right]^2 - 2 \cdot \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{TPS} - 2 \cdot \\ &\left[X_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \right] \cdot Y_{TPS} + Y_{TPS}^2 \end{aligned} \quad (4.32)$$

Anschließend folgt durch Auflösen der quadratischen Gleichung $aX^2 + bX + c = 0$ mit den reellen Koeffizienten (der Schnitt eines Kreises mit einer Geraden durch den Mittelpunkt ergibt immer zwei reelle Lösungen, wobei die zweite Lösung mit der „negativen“ Distanz immer ausgeschlossen werden kann) nach

$$X_{D,i} = -b_i \pm \sqrt{\frac{b_i^2 - 4 \cdot a_i \cdot c_i}{2 \cdot a_i}} \quad (4.33)$$

die reelle Lösung aus

$$a_i = \left[1 - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \right]^2,$$

$$b_i = -2 \cdot X_{TPS} + 2 \cdot \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot \left[X_{GPS,k} - \frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \cdot Y_{TPS} \right] - 2 \cdot \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{TPS} \quad (4.34)$$

$$c_i = X_{TPS}^2 + \left[X_{GPS,k} - \left(\frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \right]^2 - 2 \cdot \left(X_{GPS,k} - \frac{X_{GPS,k} - X_{GPS,k+1}}{Y_{GPS,k} - Y_{GPS,k+1}} \right) \cdot Y_{GPS,k} \cdot Y_{TPS} + Y_{TPS}^2 - S_{D,i}.$$

$y_{D,i}$ ergibt sich durch Einsetzen in die Gleichung (4.30).

Durch die Betrachtung der PC-Zeit kann zusätzlich die Totzeit der Richtungs- und Distanzmessung berechnet werden. Anhand dieser Gleichungssysteme ist man in der Lage, die einzelnen Zeitmarken der Tachymeterbeobachtungen r_i ($\approx \zeta_i$) und $S_{D,i}$ absolut zu bestimmen. Untersuchungen mit dem Leica TCA2003 ergaben, dass bei diesem Instrument Regelmäßigkeiten der Latenzzeiten $\Delta t_{D,r,j}$ existieren. Unter Berücksichtigung der deterministischen und stochastischen Fehleranteile sowie der Beobachtungsfehler lassen sich hier die Zeitabstände auf einzelne Niveaus zusammenfassen. Die beiden nachfolgenden Abbildungen zeigen dies an einer Richtungs- und Distanzmessung.

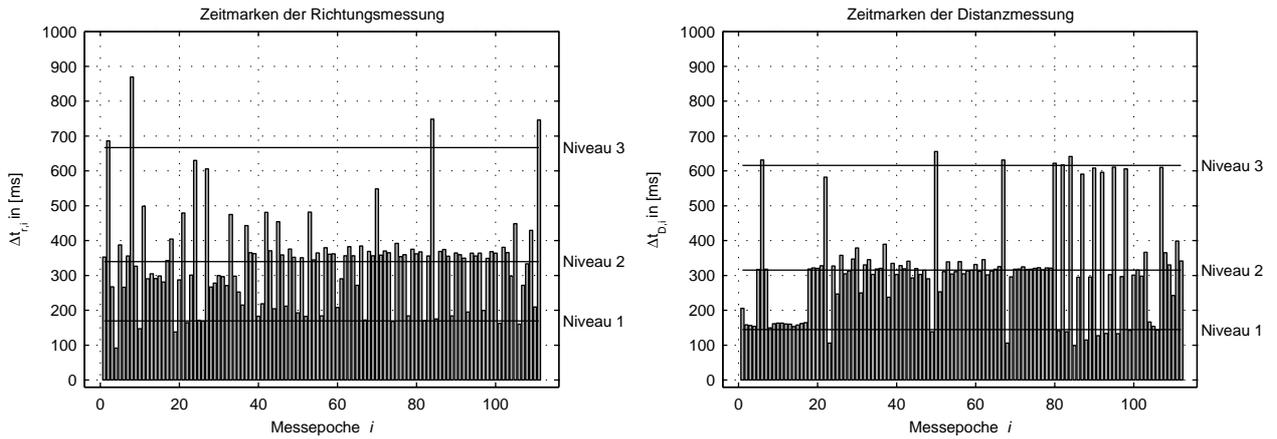


Abbildung 4.29: zeitliches Verhalten von $t_{D,i}$ und $t_{r,i}$ des Leica TCA2003 Tachymeters mit **GeoBasic**

Außerdem muss neben den einzelnen Zeitmarken der Richtungs- und Distanzmessung noch ein weiterer Zeitverzug aus der Gesamtberechnung und der RS232-Übertragung berücksichtigt werden. Hierzu zeigt die Abbildung (4.30) die Verteilung der einzelnen Zeitmarken zur entsprechenden Messepoche i .

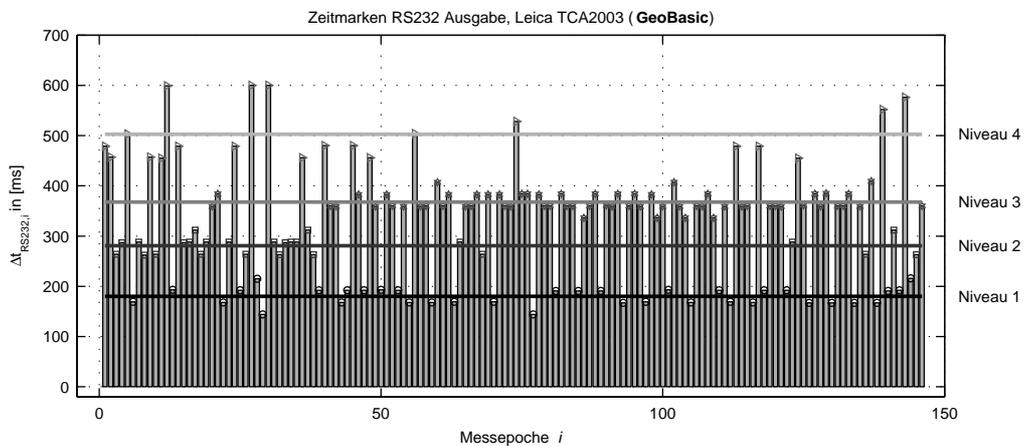


Abbildung 4.30: Zeitverzögerung der RS232-Ausgabe während der Datenausgabe

Durch ein geeignetes Verfahren kann der jeweilige Wert $\Delta t_{D,r,j}$ dem Korrekturalgorithmus in Echtzeit zugeordnet werden. Hierzu sieht man an einem weiteren Beispiel einer Distanzmessung (gesamter Messbereich links und ausgewählter Bereich einiger Messepochen rechts) den direkten Zusammenhang zwischen $t_{D,i}$ (Abb. 4.31 Subplot unten), dem Messwert $S_{D,i}$ (Abb. 4.31 Subplot oben) und dem Differenzplot $\Delta S_{D,i}$ (Abb. 4.31 Subplot Mitte).

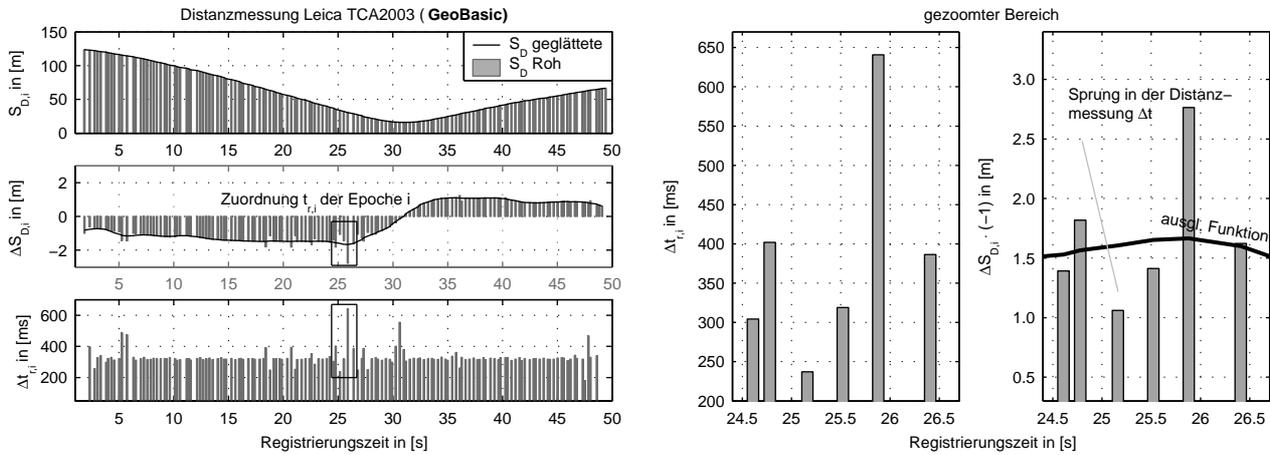


Abbildung 4.31: Kriterium zur Zuordnung von $\Delta t_{D,r,j}$ / Zeitverzögerung durch die RS232-Ausgabe

Auch die Latenzzeit $\Delta t_{RS232,i}$ der RS232-Schnittstellenausgabe teilt sich bei diesem Instrument in mehrere Niveauunterschiede auf. Diese Verteilung ist ähnlich der Berücksichtigung der einzelnen Latenzzeiten bei verschiedener Satellitenanzahl von GPS-Messungen zu berücksichtigen. Werden nun alle Latenzzeiten $\Delta t_{D,r,j}$ und alle Berechnungs- und Ausgabeverzögerungen bei der online Korrektur kinematischer Messungen berücksichtigt sowie einfache Glättungsfunktionen (z. B. gleitendes Mittel bei linearen Bewegungen) angewendet, kann dadurch eine erhebliche Genauigkeitssteigerung in den drei-dimensionalen Koordinatenberechnungen erreicht werden.

Anschließend ist kein systematischer Fehler im Lage- und auch im Höhenplot erkennbar. Das Positionsrauschen entlang der homogenen Fahrspur variiert nur noch im Bereich der Messungenauigkeit der Subsysteme. Somit entspricht die kinematische Messunsicherheit der statischen Messunsicherheit. In Abhängigkeit der Entfernung können so Genauigkeiten von wenigen Zentimetern, bei kurzen Distanzen bis etwa 50 m sogar im Millimeterbereich erreicht werden (vgl. Abb. 4.32).

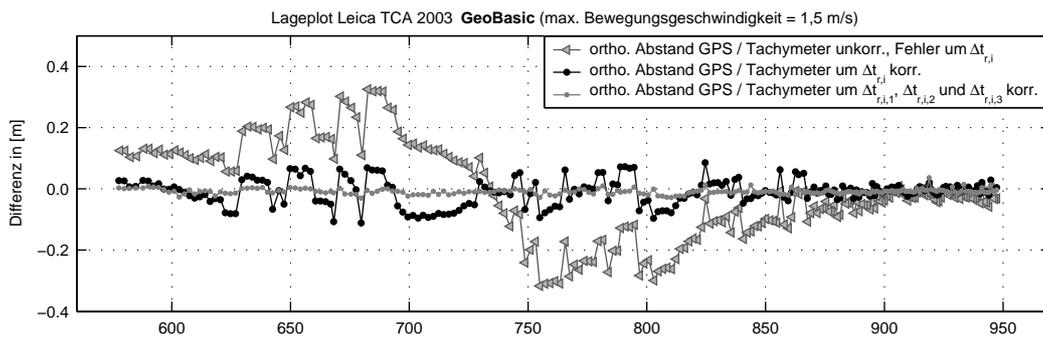


Abbildung 4.32: um $\Delta t_{D,r,j}$ korrigierte und geglättete Tachymeterpositionen des Leica TCA2003, Lage

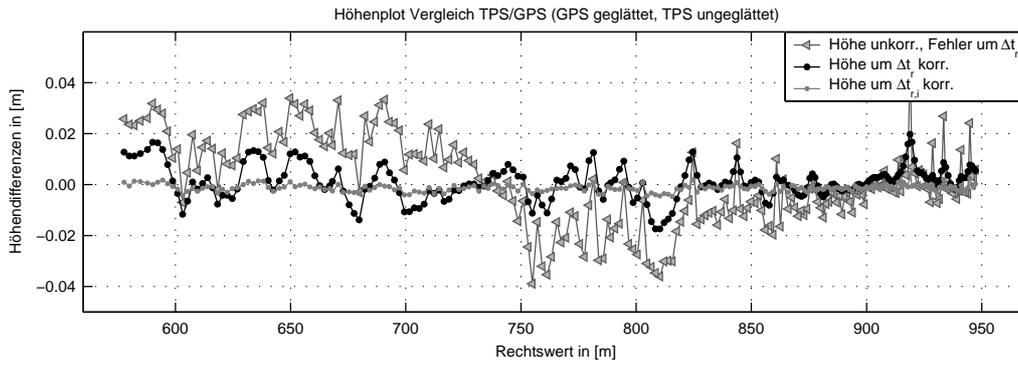


Abbildung 4.33: um $\Delta t_{D,r,j}$ korrigierte und geglättete Tachymeterpositionen des Leica TCA2003, Höhe

4.3 Kalibrierungsanlage

Zur genauen Kalibrierung kinematischer Messungen mit zielverfolgenden Servotachymetern ist zunächst ein Bewegungssimulator mit einer Länge von mehr als 15 m und einer Führungsgenauigkeit besser 0,5 mm erforderlich. Die Angaben beruhen auf Erfahrungswerten, die bei der Untersuchung an verschiedenen Instrumenten gesammelt werden konnten. Wird idealerweise ein linearer Bewegungssimulator verwendet, so kann durch Verwendung von exakt getriggerten Laserinterferometermessungen (genaue Funktionsbeschreibung z. B. in [FRIEDE, 2000] zur Anwendungen bei der Lattenkalibrierung) jeder Sollwert im Bezug zur Zeitreferenz angegeben werden. Somit wird sowohl eine absolute zeitliche wie auch geometrische Referenzinformation geschaffen. Eine digitale Kamera mit externer PPS-Bildauslösung (z. B. Nikon D1x) kann als zusätzliche Verifizierung verwendet werden. Das gesamte Kalibrierungssystem setzt sich somit wie folgt zusammen.

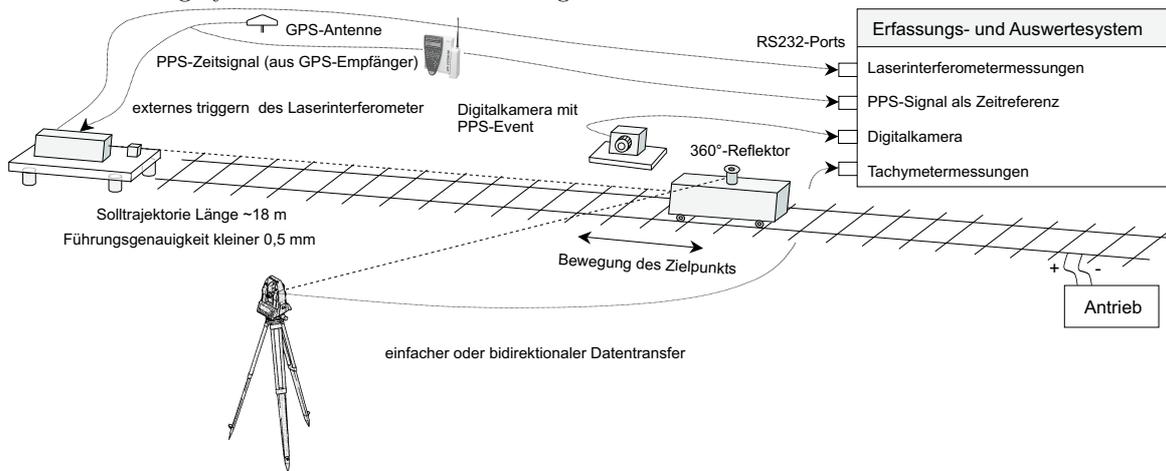


Abbildung 4.34: Modell - Kalibrierungsanlage für zielverfolgende Servotachymeter

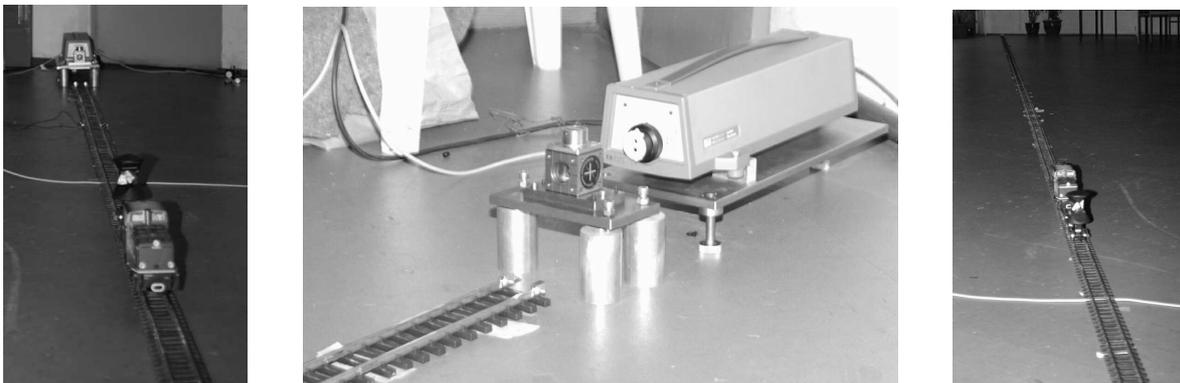


Abbildung 4.35: Bilder der temporären Kalibrierungsanlage am Geodätischen Prüflabor - Eichenau

Am Prüflabor des Lehrstuhls für Geodäsie wurde eine solche Anlage temporär im Außeninstitut Eichenau aufgebaut. Damit konnten die beschriebenen Einflussgrößen kinematischer Messungen mit dem zielverfolgenden Servotachymeter ausreichend genau bestimmt und verifiziert werden. Die Auswertung und Berücksichtigung der Zeitinformation wurde gemäß Kapitel 2 realisiert. Da für die Bewegungssimulation eine Modelleisenbahn verwendet wurde, musste in einem ersten Schritt die Geometrie der Gleise statisch (hier mit einem Stützabstand von $\sim 0,5$ m) bestimmt werden. Anschließend wurden mit sehr langsamen Prismabewegungen Beobachtungen im Tracking-Mode aufgezeichnet und der Bahngeometrie gegenübergestellt. Die Ergebnisse der Messung mit den Stützabständen zeigt Abbildung (4.36). Das Schienensystem musste so eingerichtet werden, dass der reflektierte Messstrahl des Laserinterferometers ausreichend starke und somit unterbrechungsfreie Messwerte entlang der gesamten Trajektorie lieferte.

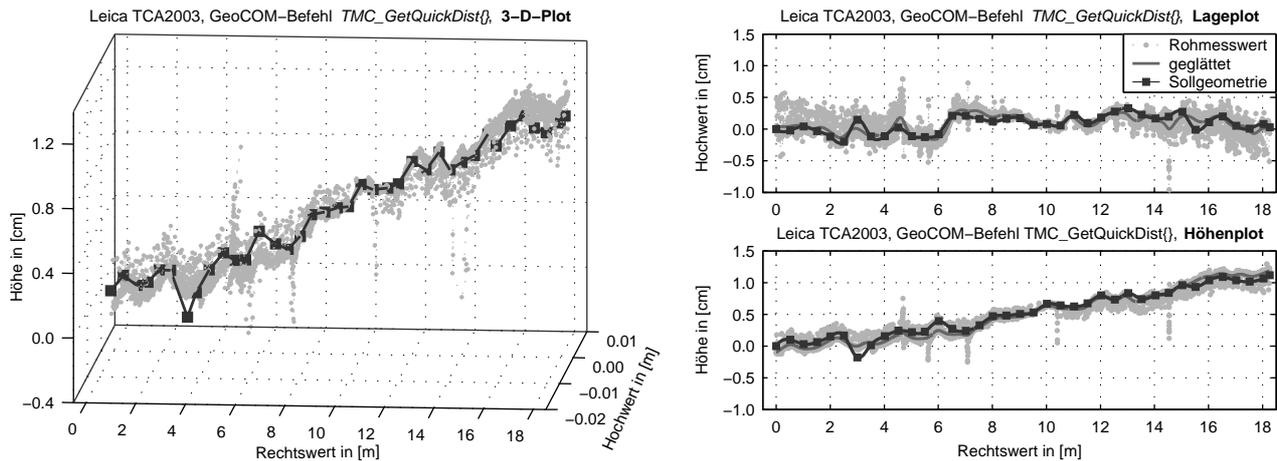


Abbildung 4.36: Geometrie und Führungsgenauigkeit des Bewegungssimulators

Da man mit dieser Kalibrierungsanlage alle gesuchten Zeitmarken eines zielverfolgenden Servotachymeters messen kann, eignet sich ein solches Vorgehen ideal zur Bestimmung der einzelnen Latenzzeiten $\Delta t_{D, r, j}$. Aus dem Zusammenwirken der GPS-getriggerten Laserinterferometerwerte kann wiederum über die PC-Zeit der Zeitpunkt aller Messdaten berechnet werden. Der folgende Ausschnitt einer Kalibrierungsmessung an der Versuchsanlage illustriert alle Messwerte einer Epoche grafisch und alphanumerisch (Messfile).

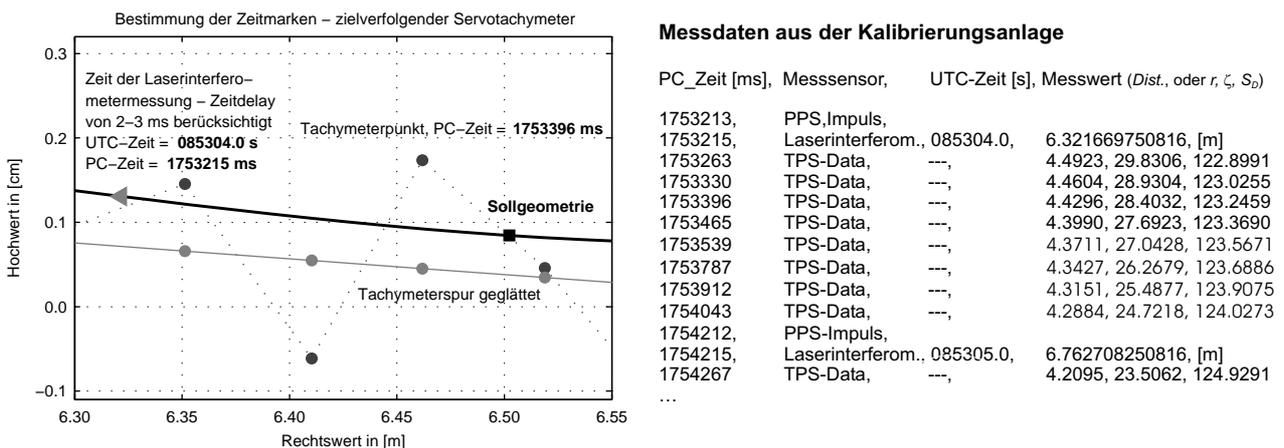


Abbildung 4.37: Zeitmarken des Leica TCRA1101plus mit dem GeoCOM-Befehl `TMC_GetQuickDist{}`

Unter Verwendung der Gleichungen (4.29) sowie (4.33 und 4.35) können $t_{r,i}$ und $t_{D,i}$ exakt bestimmt werden. Durch einfache Interpolation der PC-Zeitmarke des ersten Datenstrings (hier beim Eintreffen der ersten Zahl der Distanzmessung) folgt $t_{RS232,i}$. Somit ergibt sich eine sichere und unabhängige Methode der Bestimmung aller Messzeitpunkte von zielverfolgenden Servotachymetern beliebiger Bauart (vgl. Abb. 4.29 und 4.31). Die entsprechende Messfrequenz in Abhängigkeit der Instrumentenkonfiguration und des verwendeten Messverfahrens ist

hier ebenfalls zu untersuchen. Wie die Darstellung (Abb. 4.9) zeigt, unterscheidet z. B. der Leica TCRA1101plus automatisch zwischen statischem und bewegtem Zielpunkt und ändert so selbstständig seine Messverfahren bzw. die Positionsangabe. Vermutlich sendet das Instrument beim GeoCOM-Befehl `TMC_GetQuickDist{}` im Ruhezustand nur den Mittelwert aus zwei Positionen (Mittelwert der Messdauer = 232 ms, hingegen ist der kinematische Mittelwert der Messdauer = 123 ms). Eigentlich wäre zu erwarten, dass bei kinematischen Messungen durch den zusätzlichen Rechenaufwand in den einzelnen Subsystemen eine geringere Messfrequenz existiert.

Die Darstellung der unkorrigierten und korrigierten Positionen mit der GeoCOM-Funktion `TMC_GetQuickDist{}` inkl. der Lage- und Höhenkorrekturvektoren veranschaulicht den systematischen Fehler aus der unzureichend synchronisierten Winkel- und Distanzmessung in einem kleinen Wertebereich.

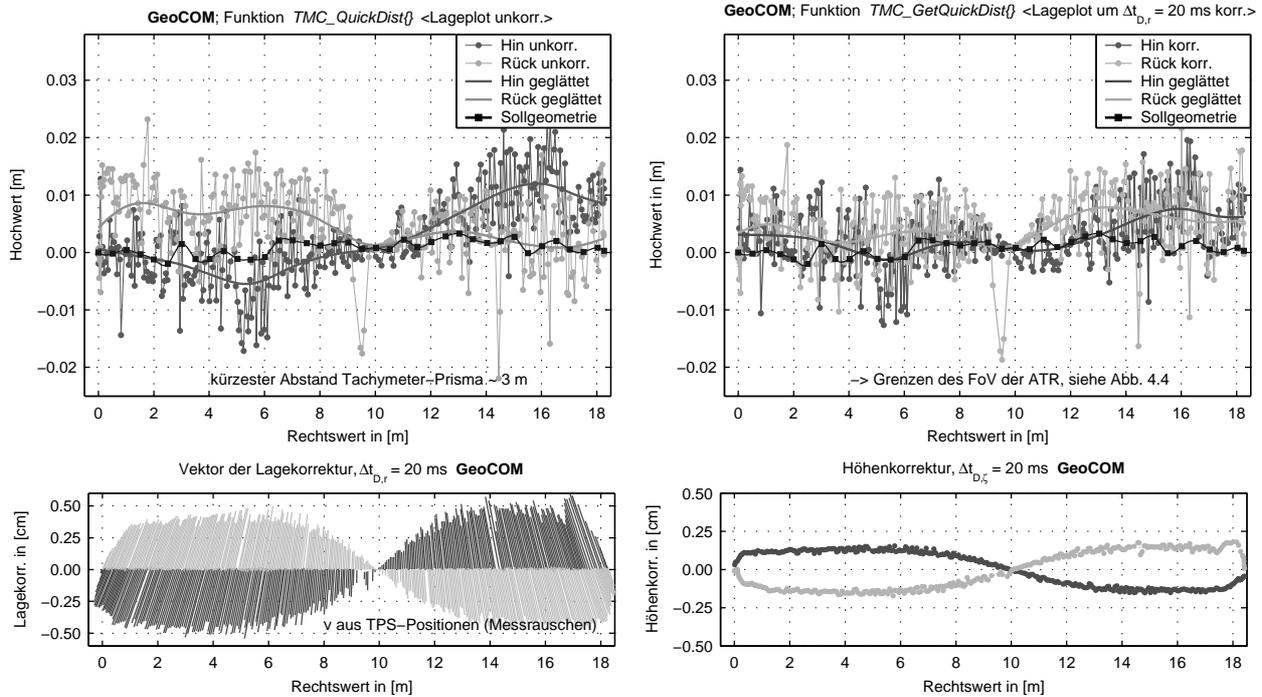


Abbildung 4.38: Ergebnisse an der Kalibrierungseinrichtung mit dem Leica TCRA1101plus

Noch deutlicher wird die Notwendigkeit der zeitlichen Kalibrierung bei der Betrachtung der kinematischen Tachymetermessungen mit GeoBasic (siehe Abb. 4.39). So ergeben sich in diesem Beispiel Ablagen von maximal 16 cm aus der Gleichung (4.8) mit $0,8 \text{ m/s} \cdot 200 \text{ ms}$ (Bewegungsgeschwindigkeit · Latenzzeit). Anschließend enthalten die korrigierten Positionen nur noch das Messrauschen der Winkel- und Distanzmessung. Diese Größen geben schließlich die Messunsicherheit der kinematischen Beobachtungen als Endergebnis der kinematischen Genauigkeitsbetrachtung an.

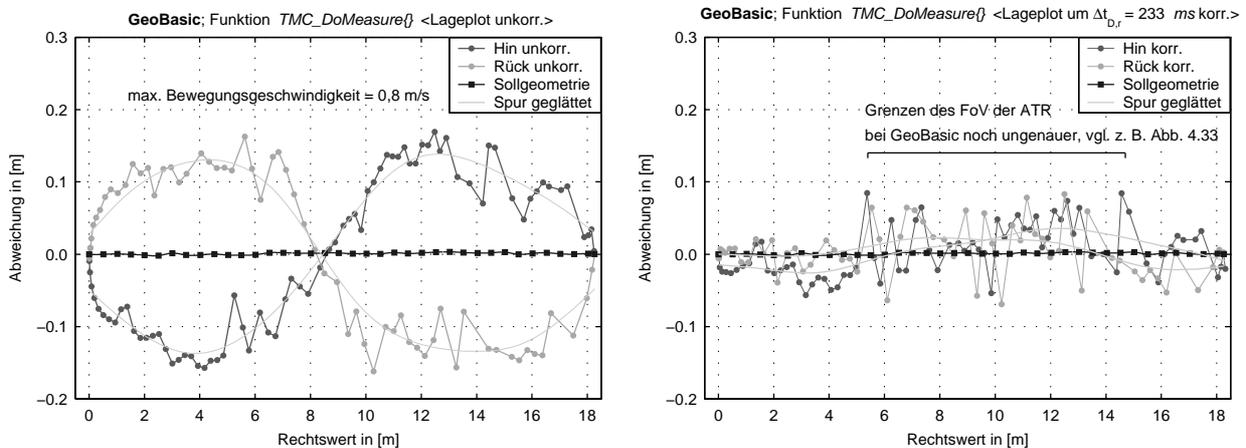


Abbildung 4.39: Ergebnisse an der Kalibrierungseinrichtung mit dem Leica TCRA1101plus

Zur **Konzeption der Kalibrierungseinrichtung** ist auf die angegebenen Größen bzgl. der Anordnung, der Führungsgenauigkeit und der Bewegungsformen (vgl. Abb. 4.2) zu achten. Als Grundformel zur minimalen Dimensionierung des Bewegungssimulators gilt hier der Ansatz

$$Anzahl_{Messpunkte} = Länge_{(Bew.-sim)} \cdot v_{F,i} \cdot f \quad (4.35)$$

mit $Anzahl_{Messpunkte} \geq 50$. Am Beispiel der GeoCOM-Messungen mit der Funktion $TMC_GetQuickDist\{\}$ (die Messfrequenz f beträgt ~ 6 Hz) sind dies

$$Anzahl_{Messpunkte} = 18 \cdot 0,7 \cdot 6 \approx 76. \quad (4.36)$$

Zusammenfassend ist die genaue Zeitbetrachtung kinematischer Messungen mit zielverfolgenden Servotachymeter zur fehlerfreien Traktorienbestimmung zwingend erforderlich. Neben den grundsätzlichen, statischen und kinematischen Aspekten (siehe z. B. Prüfkatalog in [HENNES u. KRICKEL, 2000]) wurden Verfahren aufgezeigt, die den Synchronisationsfehler und die Totzeiten der Subsysteme bestimmen und mittels angepasster Eichfunktionen eliminieren bzw. auf ein angepasstes Maß reduzieren. Die genannten Einflussparameter sind durch das beschriebene Verfahren zu untersuchen und mittels der aufgeführten Modellbildung zu korrigieren. Die Vorgehensweise wurde exemplarisch an den beiden Leica-Instrumenten TRA2003 und TCRA1101plus aufgezeigt. Wegen der zunehmenden Bedeutung kinematischer Messmittel für Ortungs- und Navigationsaufgaben sollte in Zukunft eine permanente Kalibriereinrichtung geschaffen werden, an der unabhängig von der Zusammensetzung des Prüflings kinematische Kalibrierungen durchzuführen sind.

5 Sensorfusion

Im Vermessungswesen sind verschiedene Arten der **Echtzeit-Kombination** unterschiedlicher Messsensoren bekannt. So wird z. B. im Bereich der Photogrammetrie das Kamera- oder Laser Scanning-System mit dem GPS-System getriggert (PPS-Event), positioniert und orientiert (erfordert eine Anordnung mehrerer Roverantennen). Bei Systemen im Bereich des „Mobile Mappings“ wie z. B. der automatischen Straßenextraktion [EL-SHEIMY, 1996] oder dem „Airborne Scanning“ werden zur Datengewinnung sowie der Objekterkennung und -beschreibung mittlerweile Hybridsysteme eingesetzt. Satellitenge tragene Systeme wie Fernerkundungssensoren oder Radarsensoren bilden ein weiteres Beispiel für die Kombination verschiedener Einzelsensoren. Der Begriff „Hybridsystem“ beschränkt sich bei der Verwendung zur Fusion kinematischer Messsensoren nicht nur auf seine herkömmliche Bedeutung (= *zweierlei Herkunft*), sondern beinhaltet gleichzeitig die Kombination von mehreren unabhängigen Subsystemen. Eine umfassende Sammlung verschiedener Beiträge zu diesem Themenbereich ist z. B. in [GRÜN u. KAHMEN, 2001] zusammengestellt.

Auch die globalen Positionierungssysteme (NAVSTAR GPS, GLONASS und in naher Zukunft auch GALILEO) müssen zur Bestimmung der Punktkoordinaten mit dem Anspruch auf höchste Genauigkeit synchronisiert werden. So zeigt z. B. die wissenschaftliche Arbeit [MATHES, 1998] ein Konzept zur Zusammenführung von GPS- und GLONASS-Messungen als Teil eines hybriden Messsystems am Beispiel des „Hybriden INS-GPS-GLONASS Kinematic System, HIGGINS“, das am Institut der Physikalischen Geodäsie der TU Darmstadt in einem mehrjährigen Forschungsprojekt ausgebaut wurde.

Die Anfänge der kinematischen Messverfahren liegen über 30 Jahre zurück, als man in Nordamerika inertielle Navigationssysteme zum Aufbau von Festpunktfeldern einsetzte [CASPARY, 2002]. Durch die gegenwärtige Verfügbarkeit von GPS ist man mittlerweile in der Lage, das ungünstige Driftverhalten dieser inertialen Messsensoren durch GPS-Positionen zu kontrollieren bzw. zu stützen. Durch die **Integration** von zusätzlichen Sensoren wie **zielverfolgende Servotachymeter, Odometer, Barometer, elektronischer Kompass, Neigungssensor, Gyroskop** oder **Radarsensoren** entstehen **Multisensorsysteme** zur Bestimmung einer Raumtrajektorie in Echtzeit. Beispiele mit der Zielrichtung automatische Straßenerkennung sind die beiden Messfahrzeuge „KiSS“ und „MoSES“ der Arbeitsgruppe „integrierte kinematische Vermessung (ikV)“ des Instituts für Geodäsie der Universität der Bundeswehr München. Die Bezeichnung **Sensorfusion** lässt sich hier aus der ursprünglichen Bedeutung des Begriffs Fusion (= *Verschmelzung oder Zusammenschluss*) auf die in der Arbeit beschriebene Aufgabenstellung anwenden. Ziel der Sensorfusion ist es zum einen, die Verfügbarkeit durch das Stützen der Zusatzsensoren zu steigern, zum anderen Ungenauigkeiten und Systemfehler durch intelligente Auswerte- und Filteralgorithmen zu minimieren.

Oft werden Multisensorsysteme für Aufgaben der Ingenieurnavigation (Begriffsdefinition aus dem Ingenieurmesskurs 2004 an der ETH Zürich, Session 3a „Monitoring und Ingenieurnavigation“, Prof. Brunner, TU Graz) angewendet. So ist man z. B. im Bereich der Landwirtschaft bestrebt, durch eine autonome Schlepperführung Bodenbearbeitungen ohne Maschinenführer durchzuführen. Ein Beispiel hierfür stellt das „AGRO NAV“ System der Fa. GeoTec dar [BITTNER, 2000]. Neben mehreren Neigungssensoren führt ein kombiniertes INS-RTKGPS-Ortungssystem mit Kalmanfilterung die kinematische Positionierung und die Synchronisierung der Sensoren in Echtzeit durch. Vergleichbare Systeme existieren z. B. in Japan [INOUE 2003]. Außerdem existieren mittlerweile viele Spurführungssysteme für Aufgaben der landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung (siehe Kap. 6).

Durch die Echtzeitfusion von GPS-Empfängern mit zielverfolgenden Servotachymetern ist man in der Lage, ein **Hybridmesssystem** (*der Begriff „hybrid“ steht hier eindeutig für die unterschiedliche Herkunft und Wirkungsweise der beiden Ortungssysteme*) zur Objekttrassenbestimmung im Zentimeterbereich zu schaffen. Die detaillierte Auflistung der jeweiligen Fehler bei kinematischen Anwendungen wurde separat in den Kapiteln 3 und 4 behandelt. In der Beschreibung zur Bestimmung der Latenzzeit bei zielverfolgenden Servotachymetern wurde lediglich ein Verfahren vorgestellt, das auf der Verwendung von GPS-Positionen mit genauen Zeitangaben basiert (vgl. Abb. 4.28). Hierbei wurde die Auswirkung der unzureichenden Synchronisation der Winkel- und Distanzmessung zur GPS-Spur berechnet, visualisiert und diskutiert (siehe Abb. 4.18, Abb. 4.27 links und die korrigierten und gefilterten Tachymeterpositionen in der Abb. 4.32). Im folgenden Abschnitt wird ein Verfahren zur Kalibrierung des kombinierten Gesamtsystems vorgestellt.

5.1 Echtzeitfusion - GPS und zielverfolgender Servotachymeter

Die primäre Motivation zur Entwicklung einer Echtzeitfusion (GPS- und zielverfolgende Servotachymeter) liegt in der Verbesserung der horizontalen und vertikalen **Verfügbarkeit** des kombinierten Systems, der **Minimierung von Störungen durch Abschattung** und der **verbesserten Positionsgenauigkeit** begründet. In den einzelnen Bereichen der Baumaschinensteuerung werden häufig störungsfreie und qualitativ hochwertige Positionsinformationen in einem applikationsabhängigen Toleranzmaß von wenigen Zentimetern bis hin zu einigen Millimetern für die Prozesssteuerung benötigt. Eine weitere Anwendung stellt z. B. die Verwendung eines Referenzsystems zur Verifizierung von Precision Farming-Systemen dar [STEMPFHUBER, 2001a]. Die in den beiden vorhergehenden Kapiteln unter dem Gesichtspunkt der stand-alone Anwendung des terrestrischen und globalen Positionierungssystems beschriebenen Ausführungen bzgl. **Leistungsfähigkeit, Einschränkung, Fehlerquellen** und **Echtzeittauglichkeit** bilden die Grundlage der Sensorfusion. Die Synchronisation - d. h. die Forderung der Zeitgleichheit während der Verwendung verschiedener Sensoren bei kinematischen Beobachtungen - stellt eine wesentliche Schwierigkeit dar. Unabhängig von der Sensorart, der Messfrequenz sowie der Positions- und Zeitgenauigkeit wird ein Verfahren vorgestellt, das jede beliebige Objektbewegung erfasst, darstellt und die sensorabhängigen Störparameter minimiert.

Modell

Die Grundlage der Fusion bildet das Erfassungssystem, das unter der Abbildung (2.9) dargestellt ist. Für Objektbewegungen von mehreren m/s ist eine Rohdatenerfassung mit entsprechendem Zeitstempel im Bereich von ± 1 ms ausreichend (vgl. Kapitel 2). Zunächst müssen die in Echtzeit beobachteten Daten separiert, formatiert, transformiert (GPS- und TPS-Zielsystem müssen identisch sein) und reduziert werden. Dieses Softwaremodul ist abhängig von der Datenstruktur der verwendeten Messsensoren, dem Ausgangs- und Zielsystem sowie den Anordnungen der Zielpunktsexzentrizitäten. Alle bereits erwähnten Korrekturen bzgl. der Echtzeitfähigkeit und der Totzeit (aus der Berechnung und Datenübertragung) sind im Auswerteverfahren zu berücksichtigen. Eine weitere hilfreiche Funktion des kombinierten Gesamtsystems kann durch das **automatische Wiederauffinden eines verlorenen Prismas** durch transformierte GPS-Koordinaten als Suchpositionen des zielverfolgenden Servotachymeters erreicht werden (Darstellung des Grundkonzepts unter Abb. 5.1). Die Einschränkung wird durch das FoV des zielverfolgenden Servotachymeters definiert. Bei zu schnellen bzw. ungleichförmigen Zielpunktswegungen ist das Zeitintervall zwischen der Spotdetektion und der Informationsverarbeitung zu lang, d. h. ein selbstständiges Auffinden des Prismas ist nicht mehr möglich.

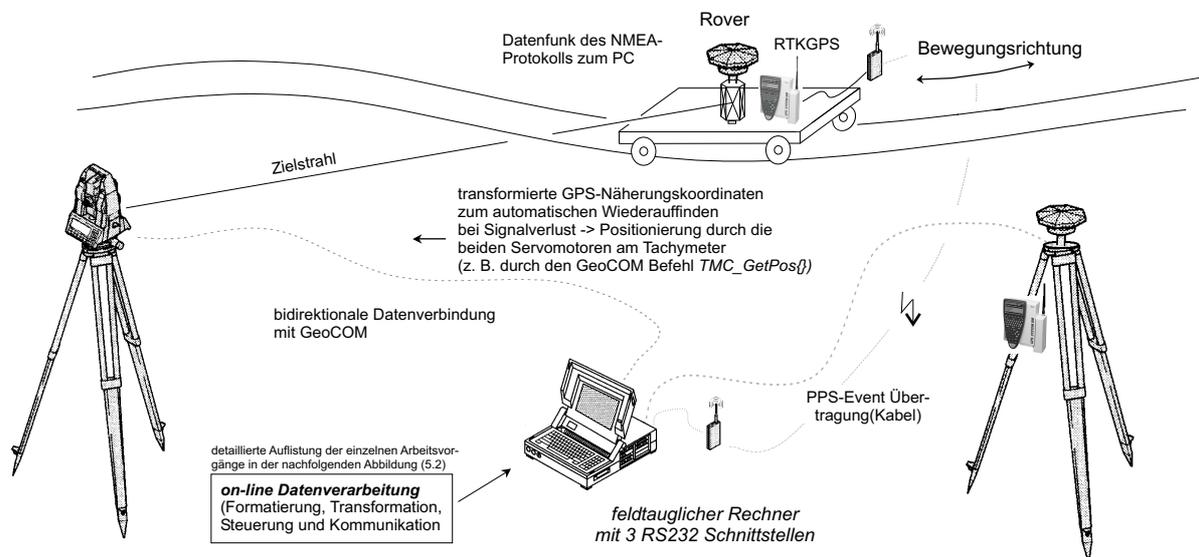


Abbildung 5.1: automatisches Wiederauffinden des Prismas bei einem Signalabbruch

Ein zusätzlicher Ansatz zur schnelleren Lösung der Ambiguitäten bei GPS könnte durch die Integration transformierter Näherungskoodinaten aus dem TPS-Sensor realisiert werden. Die Tachymeterpositionen müssen hierbei in das WGS84-System transformiert und die Orientierung des Instruments entsprechend einer definierten Richtung gesetzt werden. Anschließend müssen die Daten dem GPS-Empfänger als Näherungsposition online

zugeführt werden. So wären die Positionen im NMEA-Format (Phase- oder Code-Lösung) nach der Störung der Satellitensignale innerhalb weniger Sekunden verfügbar.

Unabhängig vom Automatisierungsgrad des kombinierten GPS-Servotachymetersystems und den integrierten Zusatzgeräte wie z. B. einem Neigungssensor ergeben sich das **Messdatenfile** mit dem präzisen PC-Zeitstempel pro Messwert und die notwendigen online Arbeitsschritte für die Sensorfusion folgendermaßen:

Beispiel eines Messdatenfiles (LogFile.txt)

```

Art: PC-Zeitstempel: Daten <Messstring>
GPS1: 605,752 $GPGGA,125309.00,4829.8146951,N,01126.9188734,E,3,07,1.0,465.961,M,,0.00,0000*2D
GPS2: 605,752 $GPGGA,125309.00,4829.8146977,N,01126.9188723,E,3,07,1.0,465.966,M,,0.00,0000*2D
TPS: 605,799 25.7172, 99.6525, 16.271,
TPS: 606,686 25.7175, 99.6522, 16.270,
Neig: 606,692 PCN1 X:-0.155 Y:+0.338;
PPS: 606,713 UTC-Zeit 12:53:10,0
GPS1: 606,762 $GPGGA,125310.00,4829.8147034,N,01126.9188668,E,3,07,1.0,465.957,M,,0.00,0000*23
GPS2: 606,752 $GPGGA,125310.00,4829.8146951,N,01126.9188734,E,3,07,1.0,465.961,M,,0.00,0000*2D
TPS: 607,093 25.7175, 99.6522, 16.270,
Neig: 607,292 PCN1 X:-0.154 Y:+0.336;
...
    
```

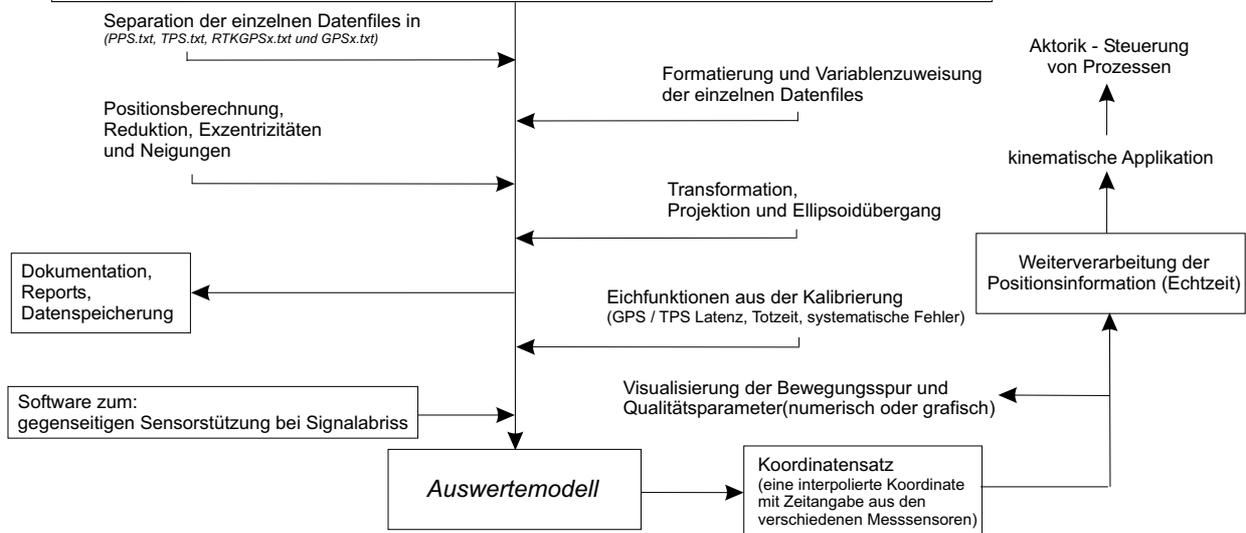


Abbildung 5.2: physikalisches Modell der GPS-/TPS-Sensorfusion

Zunächst erfolgt eine strenge Trennung der Rohmessdaten mit der dazugehörigen Zeitinformation bzgl. der Sensorart. Nach der Positionsberechnung mit Berücksichtigung von Zielpunktsexzentrizitäten (bei GPS-Antennenexzentrizitäten und -höhen, beim Tachymeter Achs- und Exzentrizitätsfehler, Additionskonstanten) und Reduktionen (ggf. Neigungskorrekturen, vgl. Absatz 4.1.3) können die beiden Messungen durch eine Transformation in ein einheitliches Koordinatensystem (Ziel- oder Auswertesystem) überführt werden. Dies erfolgt entweder über eine dreidimensionale Helmerttransformation mit genügend identischen Punkten oder durch die Verwendung eines bekannten Transformationsparametersatzes. Wird ein lokales Koordinatensystem (z. B. das Tachymetersystem, definiert durch die Tachymeterorientierung, die Richtungs-, Zenitwinkel- und Distanzmessung sowie den Maßstab) als Zielsystem verwendet, so ist bei der Transformation auf evtl. numerische Probleme beim Übergang des globalen WGS84-Systems in das lokale topozentrische System zu achten. Durch eine Aufteilung in getrennte Höhen- und Lagetransformation (Two-Step-Transformation mit entsprechender Vor-Transformation sowie anschließender Verschiebung, Rotation und Maßstabskorrektur, siehe z. B. das Transformationsmodul der GPS-Auswertesoftware SKI-Pro [LEICA GEOSYSTEMS, 2003]) kann diese Schwierigkeit geschickt umgangen werden. Beim Übergang der WGS84-Koordinaten in ein Landessystem (z. B. das Gauß-Krüger-System) müssen des Weiteren der Ellipsoidübergang und die Projektionsverzerrung berücksichtigt werden. Die Informationen bzgl. der Orientierung und der Geschwindigkeit können aus der Position zu einer Messepoche ϵ_{i-1} der GPS oder aus den Tachymetermessungen abgeleitet werden. Bei $v \approx 0$ kann die Orientierung nicht bestimmt werden. Ein weiteres wichtiges Modul stellen die Dokumentation aller Messgrößen sowie die Speicherung aller Zusatzinformationen dar. Erfahrungen haben gezeigt, dass es sehr hilfreich ist, z. B. die Kompensatorwerte und Horizontalkorrekturen bei den Tachymetermessungen sowie Rohmessdaten bei GPS zusätzlich zu speichern. Alle zeitlichen und messtechnischen Einflussgrößen (vgl. Kapitel 3 und 4) der beiden Messsensoren müssen zwingend

als Eichfunktion in die Auswertung einfließen. So können mit dem Messsystem Positionsgenauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden. Die zusätzliche Option zur Steigerung des Automatisierungsgrades durch ein gegenseitiges Stützen der beiden Systeme wird unter Abbildung (5.1) aufgezeigt.

Nach der Auswertung und Messdatenumformung in Echtzeit liegen die jeweiligen GPS- und TPS-Beobachtungen im Auswertesystem vor. Von einer Kombination der Messergebnisse kann über einen einheitlichen Zeitstempel und das gemeinsame Koordinatensystem hinaus nicht gesprochen werden, da keine direkte Kommunikation zwischen den Sensoren existiert. Des Weiteren sind die Standardabweichungen in der Auswertung zu berücksichtigen. Die Visualisierung einer Messreihe (der Positionsplot von GPS- und TPS-Messungen mit jeweiliger Zeitangabe zeigt einen Ausschnitt einer Bewegungsbeobachtung von etwa 5 Sekunden Länge in Abb. 5.3) illustriert den beschriebenen Sachverhalt.

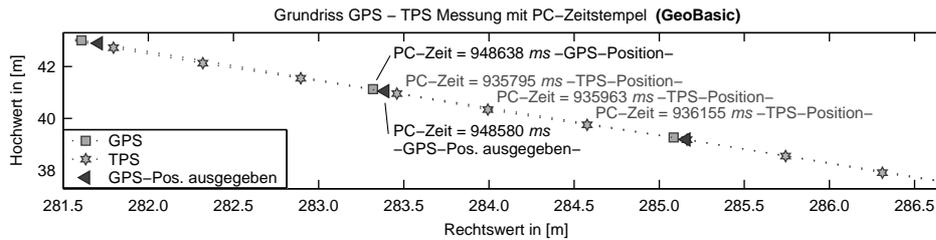


Abbildung 5.3: GPS-TPS-Positionen mit Zeitinformation im transformierten Auswertesystem

Die Beschreibung des Auswertemodells und der Datenfilterung wird im Anschluss behandelt.

5.2 Kalibrierung des Gesamtsystems

Der Einsatz kinematischer Messsysteme zur fehlerfreien Bestimmung einer Raumtrajektorie erfordert eine methodische Vorgehensweise zur Überprüfung und Kalibrierung der Sensoren. Im Abschnitt (4.1) **Standardisierung kinematischer Messungen** und der Terminologie des **ION STD 101** werden die Grundlagen der Kalibrierung mit den entsprechenden Bezeichnungen zusammengefasst. Verschiedene Gremien und Fachtagungen nationaler und internationaler geodätischer Vereinigungen arbeiten derzeit an Konzepten zur Normung, Akkreditierung, Zertifizierung und Rückführbarkeit kinematischer Messungen.

Diese Arbeit beschränkt sich auf die Kalibrierung und Kombination von GPS und zielverfolgendem Servotachymeter für kinematische Messaufgaben im Zentimeterbereich. Im Prinzip ist es ausreichend, diese beiden Systeme wie in den beiden vorhergehenden Kapiteln 3 und 4 beschrieben, separat zu kalibrieren und anschließend zu synchronisieren. Eine zeitgleiche, d. h. eine kombinierte Kalibrierung hat im Bezug auf die Sensorfusion neben dem geringeren Aufwand einige Vorteile bzgl. der Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

5.2.1 Laborkalibrierung

Kalibrierungsverfahren, die in einem geodätischen Prüflabor durchgeführt werden, stellen hohe Anforderungen an die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. So lassen sich die Anforderungen an eine Kalibrierung für zielverfolgende Servotachymeter durch die Minimierung der äußeren Einflussparameter sowie eine eindeutige Definition einer Solltrajektorie realisieren (vgl. Absatz 4.3). Des Weiteren zeigt diese Anordnung, dass der Sollwert bezogen auf einen präzisen Zeitstempel durch die Verwendung eines zusätzlichen Messinstruments (in dieser Anordnung das durch den PPS-Event getriggerte Laserinterferometer) sehr gut bestimmbar ist. Laborkalibrierungen von GPS-Empfängern hinsichtlich der kinematischen Positionsgenauigkeit benötigen identische Anforderungen. Die Definition eines dem „wahren Wert“ nahen Sollwerts mit genauer Zeitangabe ist hingegen in diesen Fall nur sehr begrenzt bzw. nur mit einem sehr großen technischen Aufwand möglich. Da für die Untersuchung der GPS-Positionen kein Bewegungssimulator wie bei der Kalibrierung von zielverfolgenden Servotachymetern (vgl. Abb. 4.24 oder 4.35) vorhanden war, wurden lediglich zwei Kreissimulatoren (Abb. 5.4 links, Radius = 1,501 m und Mitte, Radius = 15 m) und ein Schienensystem (Abb. 5.4 rechts) zur Bestimmung der Standardabweichung verwendet.



Abbildung 5.4: verschiedene Bewegungssimulatoren zur Untersuchung von GPS- und TPS-Sensoren

Mit einem abschattungsfreien Aufbau aus der Anordnung (Abb. 3.11) für GPS-Messungen und einer zusätzlichen Datenschnittstelle kann das Positionsrauschen ausreichend genau verifiziert werden. Genauigkeitssteigernde Maßnahmen für die RTKGPS, Pseudorange-korrigierte DGPS- und stand-alone-Positionsbestimmungen können hierbei ohne Eingriff in die Hard- und Gerätesoftware (Firmware) für Echtzeitanwendungen nicht erreicht werden. Eine Kalibrierung hinsichtlich der Echtzeitfähigkeit von GPS-Positionsdaten bei Navigationsaufgaben ist lediglich durch die Bestimmung der Latenzzeit während der Positionsbestimmung bzw. -ausgabe durchzuführen (vgl. Absatz 3.2.2).

Die folgende Übersicht (Tab. 5.1) stellt noch einmal alle relevanten Kalibrierungsansätze für die Sensorfusion von GPS (Leica SR530) und dem zielverfolgenden Servotachymeter (Leica TCA2003) zusammen. Der Einfluss der Exzentrizitäten des Zielpunktes wird hier nicht mehr gesondert aufgeführt.

Sensortyp	GPS	zielverfolgender Servotachymeter
Positionsausgabe, -verfügbarkeit	sensor- und konfigurationsabhängige Größe, max. Wert [200 ms], (Kap. 3.2) Korrelation mit der Satellitenanzahl, Rohdatenspeicherung (ja/nein),	abhängig von Messverfahren, on-board Applikation \leq [300 ms] oder Client-Server Applikation \leq [50 ms], sensor- und konfigurationsabhängige Größe, (Kap. 4.2, Tab. 4.1 z. B. Abb. 4.18, 4.27 u. 4.38)
Lagegenauigkeit	RTKGPS: innere Genauigkeit $1\sigma = 0,5$ cm, äußere Genauigkeit $1\sigma = 3,0$ cm, (Kap. 3.1)	GeoBasic $1\sigma = 1,5$ cm GeoCOM $1\sigma = 0,5$ cm, (Kap. 4.2 z. B. Abb. 4.32, 4.33 u. 4.39)
Höhengenauigkeit Einflussparameter	bis etwa 3-5 cm, Satellitengeometrie u. -anzahl Abschattung, Multipath	entspricht der Lagegenauigkeit, Arbeitsbereich, Zentrierung u. Orientierung,
Synchronisation der Subsysteme	Satellitenuhr, Empfängeruhr [ns-Bereich], Positionsbestimmung	Winkel- u. Distanzmessung, Teilkreisabgriff, Kompensator, Positionsbestimmung, Korrektur und Datenpool
Einlaufeffekte, Initialisierung	Init TTF - Warm TTF (ION STD 101)	Distanzmesser etwa 5 min

Tabelle 5.1: Zusammenfassung der relevanten Kalibrierungsansätze und Einflussgrößen für eine Sensorfusion

5.2.2 Kalibrierung mit reproduzierbarer Solltrajektorie

Der Ansatz dieser Kalibrierung des integritätswahrenden Messsystems ergibt sich wiederum aus den detaillierten Beschreibungen der separaten Ansätze. Vor der Verwendung müssen Eingangsparameter wie

- Messunsicherheit GPS $\Delta UPRE$ (aus dem ION STD 101) bezogen auf die Solltrajektorie,
- Messunsicherheit TPS ΔP_{TPS}^{3-D} als Vorinformation (Winkel- und Distanzmessgenauigkeit im Trackingmode, bezogen auf einen statischen Zielpunkt unter Berücksichtigung der Prismengenauigkeit) und die
- Genauigkeit der Zeitzuordnung Δt^{PC} für GPS und TPS (siehe Registrierungssystem Abb. 2.9)

bestimmt und ggf. diskutiert werden. Da in der Praxis die Bewegungsrichtung meist horizontal verläuft (Precision Farming, Baumaschinensteuerung oder Gleisbau), kann die Auswertung auf den zweidimensionalen Fall beschränkt werden. Die Höheninformation kann getrennt betrachtet werden. Die für die Kalibrierung wichtigen Informationen bzgl. der Messunsicherheit müssen wegen des radialen Ablagevektors oder des orthogonalen Abstands zur Solltrajektorie mit dem Faktor $\sqrt{2}$ berücksichtigt werden. Die beiden anschließenden Abbildungen zeigen diesen Sachverhalt als Übersicht und als Beispiel einer Messreihe an einem geometrisch bekannten Sollkreis (Radius = 1,5015 m, mit dem ECDS System von der Fa. Kern bestimmt). Je größer der Radius der Sollgeometrie, desto geringer ist der Einfluss der schleifenden Schnitte (siehe Abb. 5.6). Die Berechnung erfolgt nach dem Ansatz der Gleichungen (4.27 - 4.35).

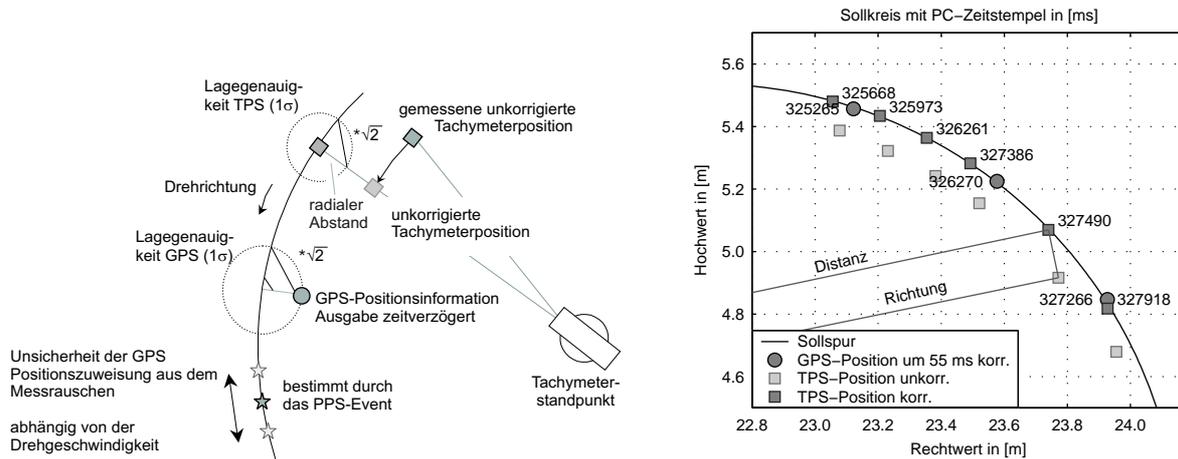


Abbildung 5.5: GPS-/TPS-Kalibrierung an einer kreisförmigen Solltrajektorie

Der wesentliche Vorteil dieses kombinierten Verfahrens liegt in der eindeutigen Angabe der Latenzzeitunsicherheit. Voraussetzung ist jedoch eine Führungsgenauigkeit von ≤ 1 mm. Dies ist beim Bewegungssimulator (Abb. 5.4 links) gegeben. Beim Schienensystem (Abb. 5.4 rechts) ist eine Reproduzierbarkeit von 1-3 mm und beim Versuchsstand der Fa. Fendt in Marktoberdorf (Abb. 5.4 Mitte) von ≤ 5 cm anzunehmen. Neben der Verifizierung der Lage- und Höhengenaugigkeit der beiden Messsensoren bzgl. der Solltrajektorie kann mit diesem Vorgehen eine Bestimmung aller Latenzzeiten von GPS und dem zielverfolgenden Servotachymeter in Abhängigkeit des Positionsrauschens und der Bewegungsgeschwindigkeit sehr einfach durchgeführt werden. Voraussetzung ist die Kenntnis der GPS-Latenzzeit Δt (siehe Tab. 3.5 und 3.6) oder eine direkte Berechnung (Vergleich der beiden PC-Zeitstempel des PPS-Events und des NMEA-Protokolls, siehe Abb. 5.2). Ein fehlerfreier Sollpunkt der Bewegungsspur mit entsprechendem Zeitstempel existiert natürlich nicht.

Durch die Umkehrung der Gleichung (4.8) in

$$\Delta t_{abw,i} = \frac{\delta S_{Sensor}}{\bar{v}_{F,i}^{2-D}}$$

mit

$$\frac{\delta S_{Sensor}}{\bar{v}_{F,i}^{2-D}} \quad \begin{array}{l} 1\sigma \text{ Positionsfehler des verwendeten Messsensors in der XY-Koordinate und} \\ \text{zweidimensionaler Geschwindigkeitsvektor} \end{array}$$

kann die Latenzzeitunsicherheit $\Delta t_{abw,i}$ berechnet werden. So verursacht z. B. ein GPS-Positionsfehler entlang der Solltrajektorie von $1\sigma = 0,02$ m ein $\Delta t_{abw,i} = 13,33$ ms ($|\bar{v}_{F,i}^{2-D}| = 1,5 \frac{m}{s}$). Des Weiteren muss das sensorabhängige Rauschen (ebenfalls in den Tab. 3.5 und 3.6 sowie in der Tab. 4.1 aufgeführt) berücksichtigt werden. Somit kann in dieser Beispielrechnung der Latenzwert für GPS und den zielverfolgenden Servotachymeter lediglich mit einer Unsicherheit von 20 ms ermittelt werden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der Bestimmung jedes einzelnen Werts Δt_i (vergleichbar mit der Methode aus dem Absatz 4.3). D. h. hier können $\Delta t_{r,i}$, $\Delta t_{D,i}$ ebenfalls für jede Epoche i berechnet werden.

Zur Minimierung der geometrischen Beeinflussung bei der Berechnung von $\Delta t_{D,r}$ müssen wie bereits erwähnt schleifende Schnitte gesondert beachtet werden. Dieser Ansatz ist in einer Simulationsrechnung mit einem Radius = 3 m unter Berücksichtigung von $\sigma(\text{GPS})$ und $\sigma(\text{TPS})$ berechnet und verifiziert worden. Die Darstellung der Ablagevektoren zwischen der Richtungs- und Distanzmessung (Abb. 5.6 rechts unten) zeigt diese geometrisch begründete Schwierigkeit an den Nullstellen. Zur Vermeidung dieses Fehlereinflusses ist deshalb entweder ein entsprechend großer Radius (Verringerung des Bereichs der schleifenden Schnitte auf der Solltrajektorie) oder eine andere Form der Solltrajektorie (vgl. Abb. 4.2) zu wählen. In einem weiteren Versuchsaufbau wurden eine nahezu lineare Anordnung der Solltrajektorie als Schienensystem (siehe Abb. 5.4) realisiert und Kalibrierungsmessungen mit GPS und dem zielverfolgenden Servotachymeter durchgeführt. Der Lageplot (Abb. 5.7) stellt die geometrische Form der Solltrajektorie dar. Da zur Datenregistrierung zwischen den Messensoren eine bidirektionale Kommunikation benötigt wurde, mussten hierzu zwei Erfassungssysteme mit separaten Rechnern verwendet werden. Die Synchronisation erfolgte wiederum durch das externe Triggern mit dem PPS-Event.

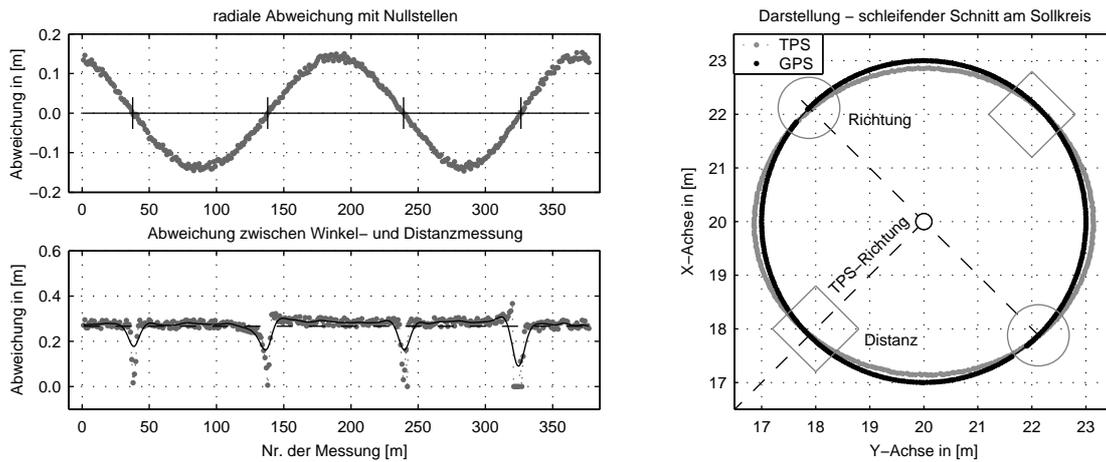


Abbildung 5.6: Problem der schleifenden Schnitte bei der Kalibrierung (Simulationsrechnung)

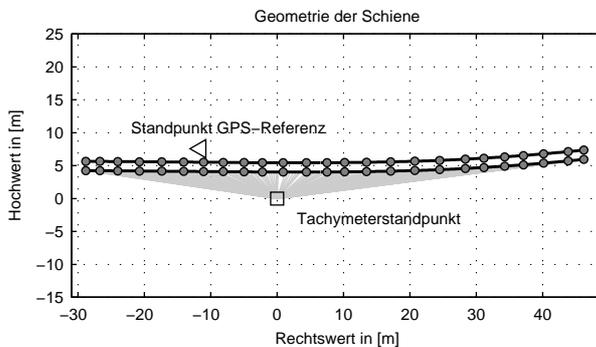


Abbildung 5.7: Schienensystem zur Kalibrierung des Gesamtsystems (München Boschetsrieder Str.)

Die Ergebnisse einer solchen gemeinsamen Kalibrierung bestätigen die Werte aus der getrennten Kalibrierung. Als Beispiel ist die Auswertung einer Aufzeichnung mit dem **GeoCOM**-Befehl `TMC_GetQuickDist{}` (Höhenplot Abb. (5.8 oben rechts und der Ablageplot in der Mitte) und der **GeoBasic**-Applikation (Abb. (5.8 oben links und unten) visualisiert. Diese Untersuchungen (Tachymetermessungen sowohl mit GeoCOM als auch mit GeoBasic) wurden an einer stillgelegten S-Bahntrasse in München/Sendling mit einem handgezogenen Wagen (siehe Aufbau unter Abb. 5.4 rechts, Bewegungsgeschwindigkeit zwischen 0,8 und 1,5 m/s) durchgeführt.

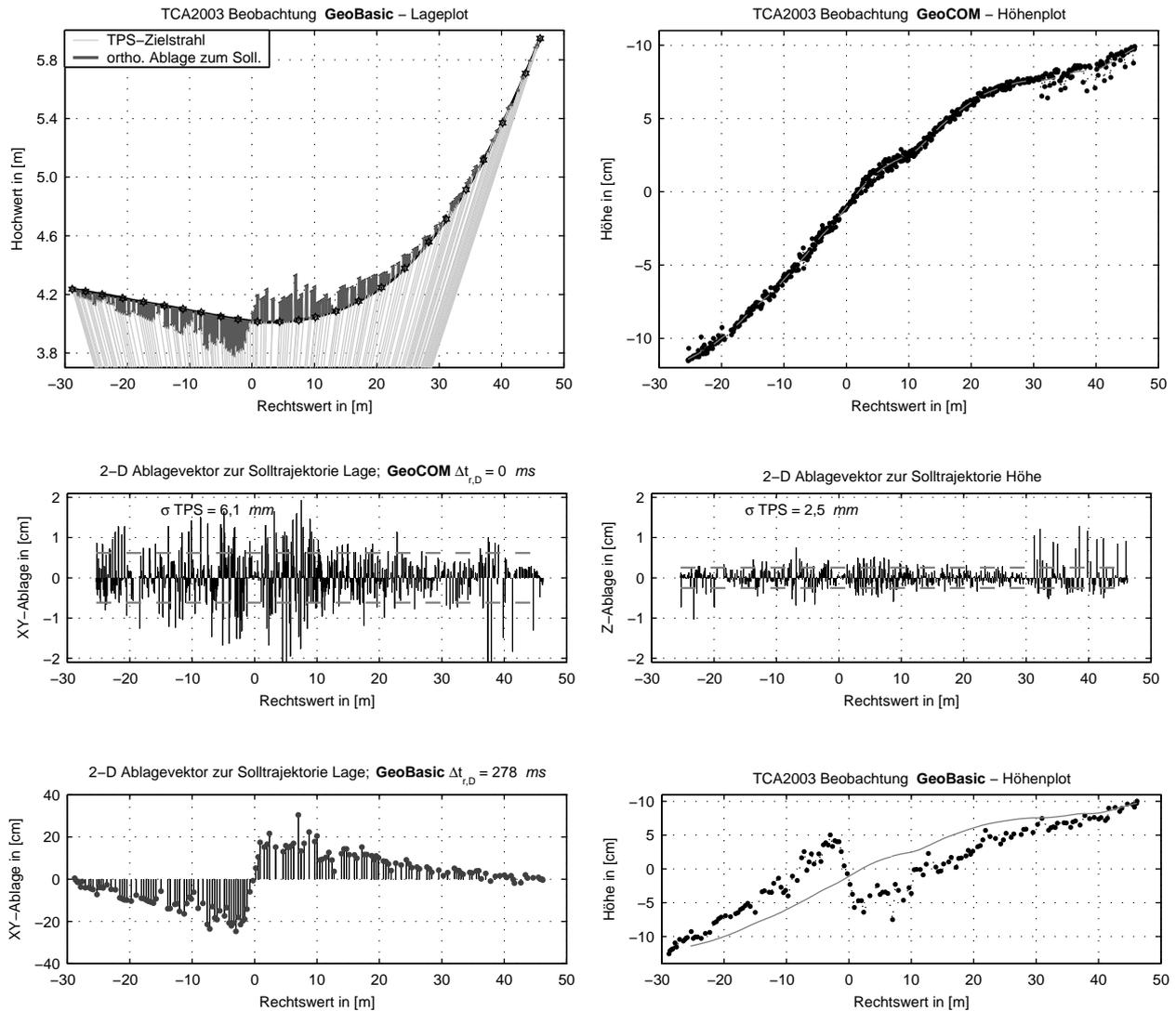


Abbildung 5.8: Genauigkeiten am Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Gesamtsystems

Der Lage- und Höhenplot stellt eine Auswertung der Positionsgenauigkeit der kombinierten Messungen in Bezug zur Solltrajektorie grafisch dar (Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Gesamtsystems, vgl. Abb. 5.7). Bei der Untersuchung und Darstellung der Latenzzeiten muss neben dem Einfluss der Positionsgenauigkeit auch die Führungsgenauigkeit berücksichtigt werden. Das Ergebnis der Latenzzeituntersuchung mit der identischen Einstellung aus Abbildung (5.8) bestätigt die separaten Ergebnisse aus dem Absatz (4.3) (vgl. z. B. Abb. 4.38).

5.2.3 Feldkalibrierung ohne reproduzierbare Solltrajektorie

Anders als bei der Feldkalibrierung mit reproduzierbarer Solltrajektorie kann bei diesem Verfahren die Latenzzeitbestimmung zwischen dem zu prüfenden GPS-System und dem zielverfolgenden Servotachymeter nur relativ erfolgen. Ein Bezug zu einer vorgegebenen Sollinformation (Trajektorie oder zeitdefinierte Sollposition) kann bei dieser Kalibrierungsmethode nicht hergestellt werden. Die Unsicherheit wirkt sich hier direkt auf die Bestimmung der Latenzzeiten aus. Der Ansatz von Abbildung (5.5) kann dabei nicht angewandt werden. Es kann lediglich ein relativer Positionsvergleich in Abhängigkeit von der geometrischen Anordnung der Solltrajektorie sowie der Bewegungsform durchgeführt werden. Eine mögliche Untersuchung der beiden Positionsinformationen zu einer Sollinformation ist mit dem gleichen Ansatz, wie bei der Sensorfusion (vgl. Abb. 5.13) denkbar. D. h. die Referenztrajektorie wird dabei aus einer ausgleichenden Funktion abgeleitet.

Als erste Information steht hier sicherlich die Auswirkung von $\Delta t_{D,r}$ (Synchronisationsfehler 1. Ordnung) visuell zur Verfügung (siehe Abb. 5.9).

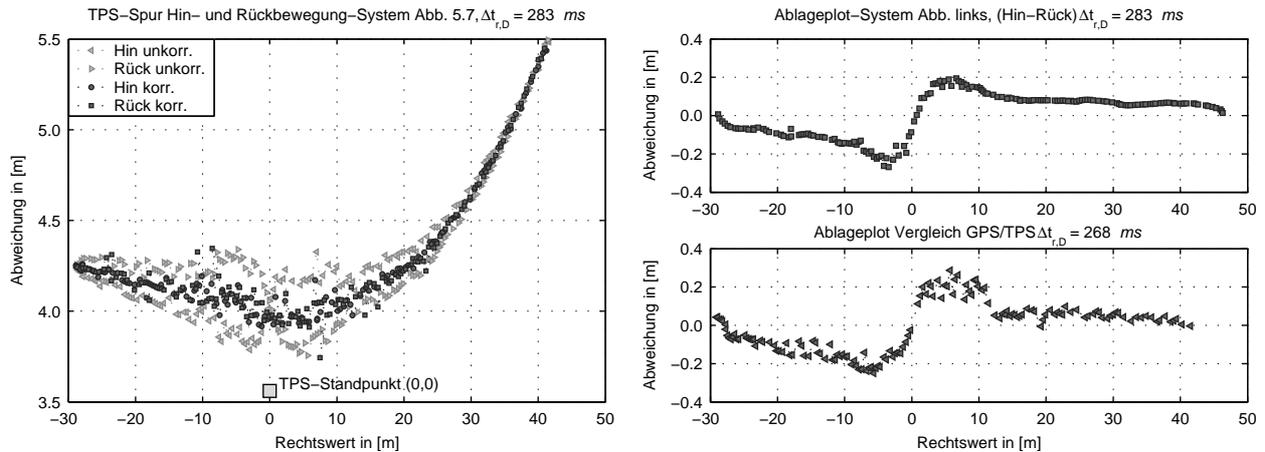


Abbildung 5.9: Vergleich TPS- (Hin-Rückmessung) und GPS- mit TPS-Messungen GeoBasic

Eine weitere Bestimmung von $\Delta t_{D,r,i}$, aufgeteilt wie unter dem Abschnitt **Genauere Betrachtung der Latenzzeit** (Absatz 4.2.2), ist möglich. Die Ergebnisse können jedoch nicht die gleiche Genauigkeitsstufe wie unter (Abb. 4.29 und 4.30) erreichen, da die Ableitung der gesuchten Größen direkt vom Messrauschen abhängt. Eine Interpretation des Synchronisationsfehlers 2. Ordnung ist somit nur in sehr begrenztem Maße und unter optimierten äußeren Bedingungen (RTK-Lösung, Abschattung, Reichweite, TPS-Messprogramm) möglich. Erfahrungen haben gezeigt, dass eine Bestimmung von $\Delta t_{D,r}$ ohne reproduzierbare Solltrajektorie lediglich im Bereich bis etwa 50 ms möglich ist. Die GPS-Latenzzeit Δt kann zeitgleich durch die Verwendung der Gleichung (3.13) berechnet werden.

5.3 Positionsschätzung kinematischer Beobachtungen

Zur Beschreibung eines bewegten Objektzustands wird neben der eigentlichen Beobachtung die Theorie der „Kinematik und Dynamik“ benötigt. Daraus lässt sich die zeitabhängige Zustandsgleichung des Systems aufstellen. Des Weiteren sind verschiedene Einfluss- bzw. Störgrößen zu erfassen und in einem Filterungs- und Auswertemodell zu integrieren. Als allgemeiner Ansatz für Aufgaben der Ingenieurnavigation kann nach [SCHRICK, 1977] folgender modifizierter Ansatz gewählt werden:

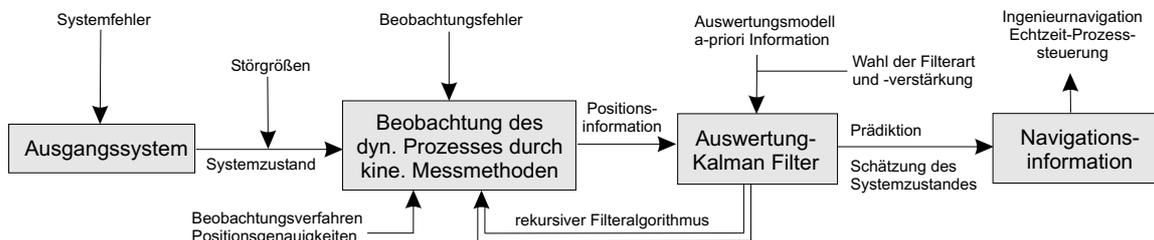


Abbildung 5.10: Zustandsschätzung in einem gestörten dynamischen System

Liegen redundante Beobachtungen vor, so werden diese zusätzlichen Informationen zur Schätzung der Zustandsparameter herangezogen.

R. E. Kalman gelang es, die im Zustandsraum formulierte Theorie der Beobachtungen linearer Systeme in Abhängigkeit der Zeit mathematisch zu beschreiben und einen rekursiven Algorithmus in Form von Differenzgleichungen sowie Verstärkungsgraden darzustellen [KALMAN, 1960]. Die Kalman-Filtertechnik ist ein Ausgleichsprozess nach der Methode der kleinsten Quadrate zur Schätzung zeitdiskreter linearer Prozesse.

Als Ausgangsbedingung ist die Normalverteilung der Zufallsvariablen (Gleichheit der Fehlervektoren und Eliminierung grober Fehler) im Markov-Prozess vorauszusetzen, d. h. die prädizierten Positionen müssen von $P(t_{i-1})$ stochastisch unabhängig sein. Mithilfe von Bewegungsinformationen wird der Zustand von P in t_{i+1} geschätzt bzw. prädiziert. Als allgemeiner Ansatz der Kalman-Filterung im linearen System seien die Systemgleichung aus

$$\vec{x}_{i+1} = \underline{A}_i \cdot \vec{x}_i + \underline{B}_i \cdot \vec{u}_i + \vec{v}_i$$

und die Beobachtungsgleichung

$$\vec{y}_i = \underline{D}_i \cdot \vec{x}_i + \underline{D}_i \cdot \vec{u}_i + \vec{n}_i$$

mit

- \vec{x} Zustandsvektor,
- \underline{A} Systemmatrix,
- \vec{v} Systemrauschen,
- \underline{B} Steuermatrix,
- \underline{C} Beobachtungsmatrix,
- \vec{u} Steuervektor,
- \underline{D} Durchgangsmatrix und
- \vec{n} Messrauschen

für die Epoche i gegeben.

Die Gleichungen des Kalman-Filters für ein solches System ergeben sich nach [SCHWARZ, 1981]

$$\begin{aligned}\hat{x}_{i+1} &= \underline{A}_i \cdot \hat{x}_i + \underline{B}_i \cdot \hat{u}_i + \underline{K}_i \cdot \left(\vec{y}_i - \underline{C}_i \cdot \hat{x}_i - \underline{D}_i \cdot \vec{u}_i \right) \\ \underline{K}_i &= \underline{A}_i \cdot \underline{Q}_i \cdot \underline{C}_i^T \cdot \left(\underline{N}_i + \underline{C}_i \cdot \underline{Q}_i \cdot \underline{C}_i^T \right)^{-1} \\ \underline{Q}_{i+1} &= \left(\underline{A}_i - \underline{K}_i \cdot \underline{C}_i \right) \cdot \underline{Q}_i \cdot \underline{A}_i^T + \underline{V}_i\end{aligned}$$

mit

- \underline{K} Korrekturmatrix,
- \underline{Q} Kovarianzmatrix des Schätzfehlers,
- \underline{V} Kovarianzmatrix des Systemrauschens und
- \underline{N} Kovarianzmatrix des Messrauschens.

Das Ergebnis des Kalman-Filters aus der Gleichung (6.4) ist die rekursive Prädiktion der Zustandsvariablen. Dabei gewichtet die Korrekturmatrix \underline{K}_i die Differenz zwischen den Messwerten \vec{y}_i und den geschätzten Messwerten \underline{C}_i und \underline{D}_i . Die rekursive Kovarianzmatrix \underline{Q}_i des Schätzfehlers ermöglicht die Anwendung des Kalman-Filters zeitinvarianter Prozesse mit zeitvariablen Parametern.

Die Anpassung der Kalman-Filtertechnik bzgl. der Problemstellung (Echtzeit-Navigationsaufgaben oder Deformationsmessungen) sowie die Berechnung ausgehend vom realen Prozess bis hin zur Prädiktion erfordert eine umfassende Kenntnis dieser Form der Ausgleichsrechnung. Entsprechend der Modellbildung kommen hier die verschiedenen Formen wie der diskrete, (lineare und erweiterte nichtlineare), kontinuierliche (Kalman-Bucy-Filter), adaptive oder robuste Kalman-Filter zum Einsatz. Viele wissenschaftliche Arbeiten befassten sich in der Vergangenheit mit der Anpassung der Kalman-Filterung ([SCHRICK, 1977], [HUEP, 1986], [PELZER, 1988], [HEUNECKE, 1995] und [WANG, 1997]) für geodätische Messaufgaben.

Für die Fusion verschiedener kinematischer Beobachtungen bietet der Kalman-Filter eine sehr effiziente Möglichkeit, die unterschiedlichen Messsensoren im Auswertalgorithmus zu kombinieren.

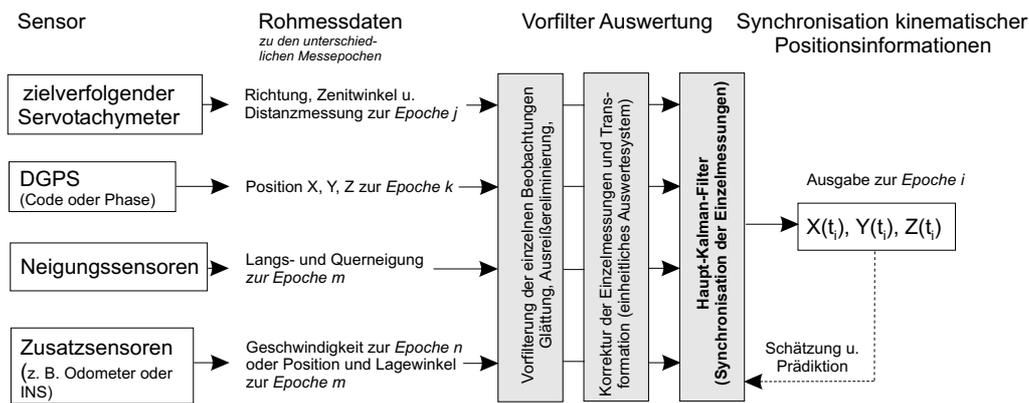


Abbildung 5.11: kaskadierendes System mit unabhängigen Vor- und Haupt-Kalman-Filter [STERNBERG, 1998]

Dieses Filterkonzept findet z. B. in den beiden Messfahrzeugen „kinematische Vermessungssystem, (KISS)“ und „Mobile Straßen Erfassungssystem, (MoSES)“ (<http://www.ikv-kiss.de/>) der Arbeitsgruppe integrierte kinematische Vermessung (ikV) der Universität der Bundeswehr München nach über zehnjähriger Entwicklungsphase Anwendung.

5.4 Synchronisationsmodell

In der vorliegenden Arbeit wurde zur Fusion der verschiedenen kinematischen Messungen kein modellbasiertes Synchronisationskonzept verwendet. Ziel dieser Sensorfusion ist es lediglich, aus den verschiedenen Positionsinformationen mit unterschiedlichen Messfrequenzen (vgl. Abb. 5.11) eine interpolierte Position auszugeben. Aus der geometrischen Anordnung der einzelnen Positionen ergibt sich folgender Modellansatz.

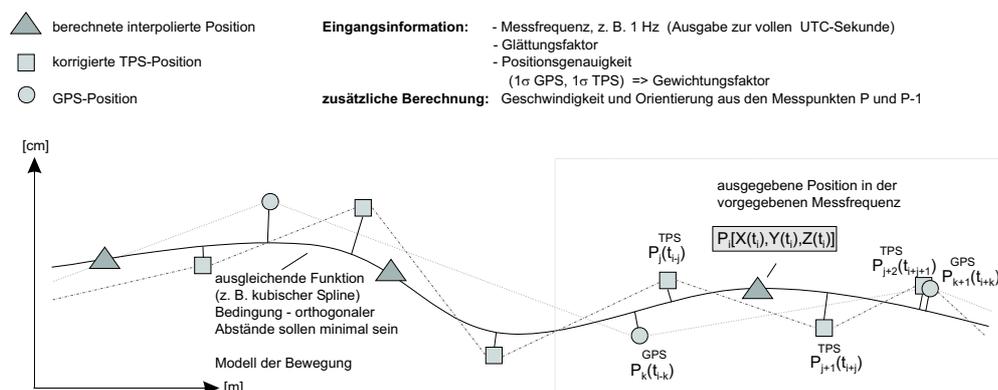


Abbildung 5.12: Konzept zur Synchronisation kinematischer Messungen mit verschiedenen Sensoren

Als Eingangsparameter sind hier die Vorinformationen der Messunsicherheit, z. B. $\sigma(\text{TPS}_{Lage})$, $\sigma(\text{RTKGPS}_{Lage})$ getrennt in Lage und Höhe anzugeben. Dadurch können die einzelnen Beobachtungen entsprechend der Vorgabe gewichtet werden. Außerdem ist die Regressionsfunktion in Abhängigkeit vom Messrauschen und der Bewegungsart zu berücksichtigen. Eine ausgleichende kubische Splinefunktion ist hier sicherlich einer Regressionsgeraden oder einem Polynomansatz vorzuziehen, da sie den Bewegungsverlauf entsprechend der Messung geeigneter modellieren kann. Die Matlab-Toolbox „Splines“ bietet hierzu eine Vielzahl von verschiedenen Funktionen an.

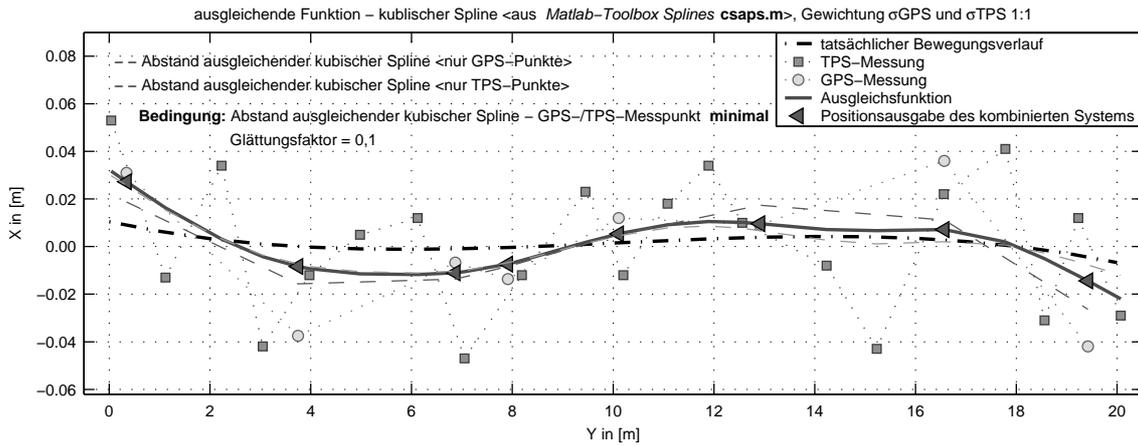


Abbildung 5.13: Ausgleichsfunktion zur Kombination von GPS- und TPS-Messungen Simulation

Neben den Eingangsinformationen $\sigma(\text{TPS}_{Lage})$, $\sigma(\text{RTKGPS}_{Lage})$ können hier Angaben zur Positionsgenauigkeit aus dem orthogonalen Abstand des Messpunkts (Berücksichtigung der Gewichtung) und des ausgleichenden Splines berechnet werden. So ergibt sich hier ein $\sigma(\text{GPS-TPS})$ als Genauigkeitsparameter des synchronisierten Gesamtsystems.

Unter Berücksichtigung aller aufgeführten Einflussparameter und der Verwendung der Ergebnisse aus der Kalibrierung ergeben sich die entsprechenden Koordinatentripel $P(X(t_i), Y(t_i), Z(t_i))$ der Sensorfusion für Echtzeit-Positionierungsaufgaben. Der abschließende Ablageplot stellt die die Abweichungen zur Solltrajektorie getrennt und synchronisiert dar (Gewichtung: TPS zu GPS = 1:0,68 aus den beiden separaten Genauigkeitsangaben).

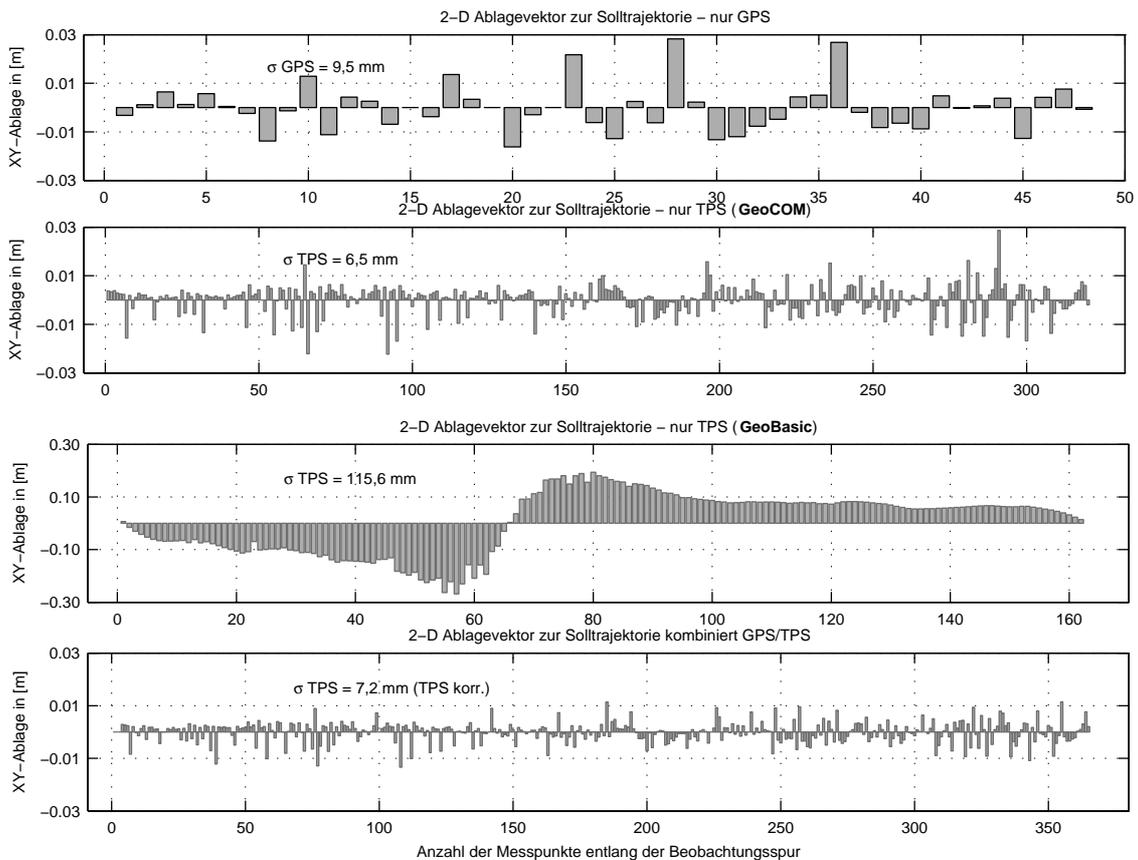


Abbildung 5.14: Endergebnis der Sensorfusion aus GPS und TPS

Da die Messgenauigkeit der verwendeten Sensoren etwa im gleichen Genauigkeitsbereich (RTKGPS-Messungen und korrigierte Messungen mit dem zielverfolgender Servotachymeter $\approx 1\text{-}3\text{ cm}$) liegen, kann hier keine wesent-

liche Genauigkeitssteigerung durch die Sensorfusion erreicht werden (vgl. unteren Subplot der Abb. 5.14). Der wesentliche Vorteil des kombinierten Gesamtsystems liegt jedoch zum einen in der horizontalen und vertikalen Verfügbarkeit (Kombination aus GPS und TPS). Zum anderen ist durch die Eliminierung der zeitlichen Fehler während der Beobachtung (unzureichende Synchronisation und Totzeit) eine Echtzeitfähigkeit im Bereich von ± 1 ms gegeben. Dies ist vor allem bei Applikationen der Ingenieurnavigation sowie der Maschinenführung (z. B. im Bereich des Precision Farming) wichtig. Das unter Abbildung (5.14) aufgezeigte Beispiel wurde im post-processing ausgewertet. Mit den GPS-Korrekturparametern aus der Abbildung (3.23), den Eichfunktionen für den zielverfolgenden Servotachymeter des Absatzes (4.2) und der Verwendung des aufgeführten Synchronisationsmodells können die kinematischen Fehleranteile während der Applikation auch online korrigiert werden.

6 Kalibrierung von Precision Farming Systemen

6.1 Grundlagen Precision Farming

Noch vor 50 Jahren war ein Großteil unserer Bevölkerung in der Landwirtschaft beschäftigt. Durch die stetigen Weiterentwicklungen der Zug-, Bodenbearbeitungs- und Erntemaschinen sowie umfassende Forschungsarbeiten im Bereich der Bodendüngung, der Herbizid-, Pestizid- und Fungizidverwendung wurde der Arbeitsaufwand immer stärker minimiert. Somit konnte eine immer kleiner werdende Zahl von Landwirten eine immer größer werdende Fläche in kürzeren Zeitabständen bewirtschaften. Im 19. Jahrhundert konnten von den Erzeugnissen eines Bauern nur etwa vier Personen ernährt werden. Heute erzeugt ein Landwirt mit einer durchschnittlichen Betriebsgröße von etwa 50 *ha* Nahrungsmittel für über 120 Verbraucher (genauere Angaben hierzu findet man z. B. unter <http://www.cma.de>). Zusätzlich verbesserten sich die in der Vergangenheit oft sehr mühsamen Arbeitsbedingungen durch den Einsatz moderner Technik zusehends.

Zu Beginn der neunziger Jahre wurde bereits die Notwendigkeit erkannt, die Technologie der kinematischen Objektortung durch GPS für landwirtschaftliche Arbeitsprozesse anzupassen. Die Verknüpfung von Positionsinformationen mit Sachdaten zur Bodenbearbeitung oder zum Bodenzustand bildet die Grundlage für Automatisierungs- und Optimierungstechnologien. Heute werden diese einzelnen Arbeitsschritte des landwirtschaftlichen Acker- und Pflanzenbaus mit dem Begriff **Precision Farming** - Präziser Ackerbau - zusammengefasst. Durch die Möglichkeit der Objektortung durch Satellitensysteme, der Datenverarbeitung mittels Informations- und Kommunikationstechnik sowie der verbesserten Sensortechnologie der letzten Jahre wurde Precision Farming in der heutigen Form erst möglich.

Wissenschaftliche Untersuchungen haben gezeigt, dass Teilbereiche (d. h. Teilschläge und Teilflächen) landwirtschaftlicher Ackerflächen hinsichtlich ihrer Erträge stark variieren [EHLERT, 1998]. Somit hilft Precision Farming nicht nur durch die bedarfsorientierte Teilschlagbewirtschaftung zur Unkraut-, Schädlings- und Pilzbekämpfung sowie die optimale Ausbringung von Mineral- und Stickstoffdünger Kosten zu sparen, sondern liefert außerdem einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Ressourcenschutz. Eine nachhaltige Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen ist eine logische Folgerung von Precision Farming. Deshalb wird diese Technologie als Schlüsseltechnologie gegen ständig sinkende Preise für Agrarprodukte im international geführten Konkurrenzkampf sowie zur Erfüllung der strengen Umwelt- und Ressourcenschutzauflagen bezeichnet. Der erste Versuch, die Heterogenität der Böden zu erfassen und gezielt zu bearbeiten, wurde bereits vor etwa 75 Jahren an der „University of Illinois“ in den USA durch die Veröffentlichung von [LINSLEY u. BAUER, 1929] aufgegriffen. Heute ist man mit den technischen Hilfsmitteln in der Lage, die Komplexität eines Feldstückes präzise zu erfassen und mittels der Teilschlagbewirtschaftung entsprechend des Bodenzustandes gezielt zu agieren.

Precision Farming wird deshalb in Fachkreisen als Chance und Motivation zur Erhaltung der landwirtschaftlichen Betriebe durch Innovation betrachtet. Die folgende Aufzählung unterstreicht diese Umbruchsphase in den landwirtschaftlichen Betrieben:

- Die gegenwärtige Phase der Umorientierung in der Landwirtschaft
(Es werden nahezu keine Einzelarbeiten mehr durchgeführt. Die Arbeitsschritte setzen sich vielmehr aus multi-komplexen Strukturen und Verknüpfungen zusammen. Des Weiteren gibt es zur Minimierung der Kosten und der Vermeidung von langen Standzeiten Zusammenschlüsse für den überbetrieblichen Arbeits- und Maschineneinsatz, z. B. durch Lohnunternehmer, bzw. den Maschinenring.)
- ökonomisch - technische Umbruchsphase vor allem in der operationalen Ebene
(Die Motivation bezieht sich hier vorrangig auf Kosten- und Personaleinsparung.)
- gesellschaftliche Anforderungen
(Rohstoffhaltung, Umwelt- und Ressourcenschutz, Qualität der Nahrungsmittel, Minimierung der Bodenzusatzstoffe)
- Minimierung der Bodenbearbeitung
(Dadurch wird eine zu starke Verdichtung der Böden verhindert.)
- Optimierung der Arbeitsabläufe und Zeitauslastung
(Der Einsatz der Maschinen ist auch nachts möglich, d. h. die Einsatzzeit kann nahezu verdoppelt werden.)

- ergonomische Gesichtspunkte für den Maschinenführer

(Die Verbesserung der Arbeitsbedingungen des Traktorfahrers reduziert gesundheitliche Schäden - Durchblutungsstörungen, Nervenfunktionsstörungen, Sehstörungen, Übelkeit, Wirbelsäulenschäden, Bandscheibenbeschwerden, Sitzbuckel, schlechte Körperhaltung. Durch die Verwendung von Precision Farming Systemen ergibt sich ein viel angenehmeres Arbeiten für den Maschinenführer - weniger Kopfbewegungen- bei verschiedenen Test empfand der Fahrer das System nach kurzer Einarbeitung von etwa einem halben Tag als angenehm.)

Die Positionsinformation spielt bei Precision Farming eine zentrale Rolle, da sie die Möglichkeit der räumlichen Zuordnung der Ausgangsdaten wie Grundstücksgrenze, Fahrgassenbreite und Bodenzustand mit den erforderlichen Schritten der teilschlagspezifischen Flächenbewirtschaftung eröffnet. In den Jahren 1990-1993 wurden am Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung der TU München (<http://www.tec.agrar.tu-muenchen.de/pflanztech>) erste Versuche zur Bestimmung von Fahrgassen mit GPS durchgeführt. Die Visualisierung der Fahrgassen veranschaulicht diese ersten Versuchsergebnisse von verschiedenen GPS-Messungen zur Ortung einer landwirtschaftlichen Maschine.

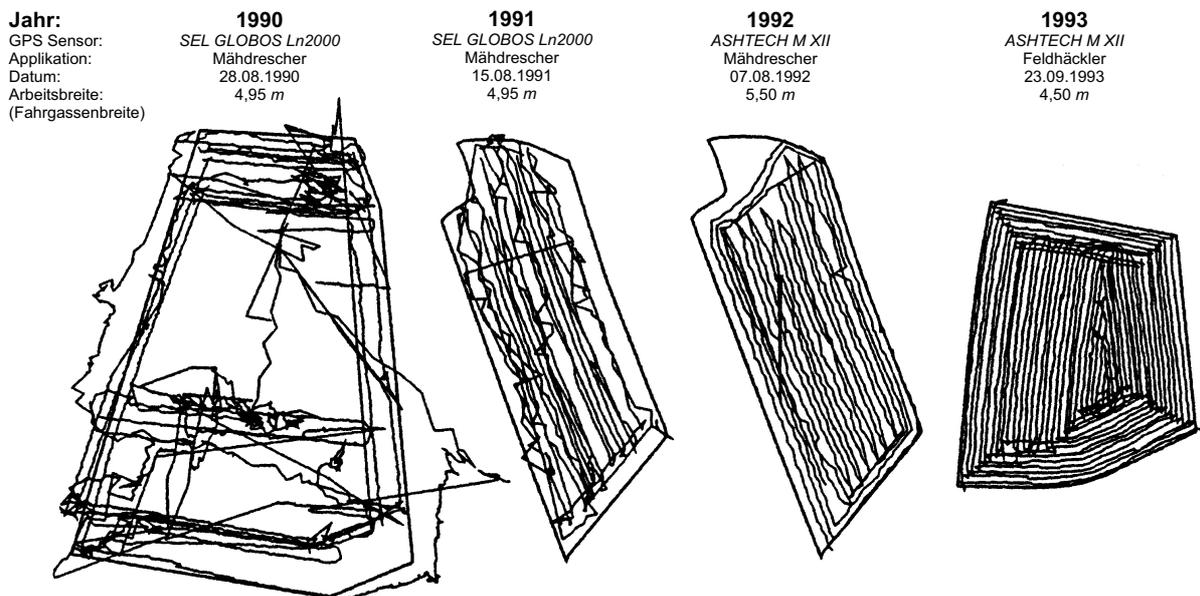


Abbildung 6.1: GPS-Fahrgassenanalyse, [AUERNHAMMER, 1995]

Neben der Positionsinformation ist die Technologie der „Geografischen Informationssysteme, GIS“ sowie der Einsatz eines intelligenten Kommunikationsmediums zur Steuerung der Aktorik notwendig. Anders als bei der Baumaschinensteuerung werden hier offene Systeme benötigt, d. h. die Schnittstelle zwischen Positionssensor, der Kommunikationsplattform und der landwirtschaftlichen Applikation ergibt sich aus Komponenten unterschiedlicher Hersteller. Die Notwendigkeit zur Definition von Standards wurde bereits sehr früh erkannt. Im Arbeitspapier 196 [AUERNHAMMER u. SCHÖN, 1993] zur Normung und Realisierung des „**Landwirtschaftlichen BUS System**“ wurde nach achtjähriger Arbeit eine Empfehlung für die Maschinenhersteller festgelegt (Erfassungssystem, Schlepper und Anbaugeräte). Als Standard-Kommunikationsmodul für das LBS-System hat sich mittlerweile das physikalische Medium „Control Area Network, CAN“ der Fa. Bosch (<http://www.can.bosch.de>), das auch in vielen anderen Branchen wie der Automobilindustrie und dem Flugzeugbau eingesetzt wird, etabliert. Viele Hersteller von Schlepper- und Anbaugeräten sowie GPS-Sensoren für landwirtschaftliche Anwendungen unterstützen mittlerweile eine solche CAN-Schnittstelle. Die Kommunikation der Einzelsensoren erfolgt mittels definierter CAN-Botschaften auf der Ebene von Austauschprotokollen. In dem komplexen Medium werden neue Teilnehmer automatisch erkannt und bei auftretenden Kommunikationsüberschneidungen oder -konflikten hierarchische Prioritäten vergeben [SPANGLER, 2001]. Der in der Arbeit untersuchte GPS-Empfänger (Trimble AgGPS132) unterstützt gegenwärtig ein solches Datenformat. Zur Zeit wird am Lehrstuhl für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung in einer weiteren wissenschaftlichen Arbeit im Rahmen des FAM-Teilprojekts LT 2 und LQ3 ein Analysetool zur Verifizierung der Echtzeitfähigkeit und Bewertung dieses genormten Kommunikationsmediums erstellt [EHRL, et al. 2002]. Die Darstellung (Abb. 6.2) des Gesamtsystems am Beispiel einer

teilschlagspezifischen Unkrautbekämpfung und zeitgleicher Getreideaussaat mit den zentralen Komponenten des Kommunikationssystems, des Ortungssensors und des Anbaugeräts veranschaulicht den Sachverhalt.

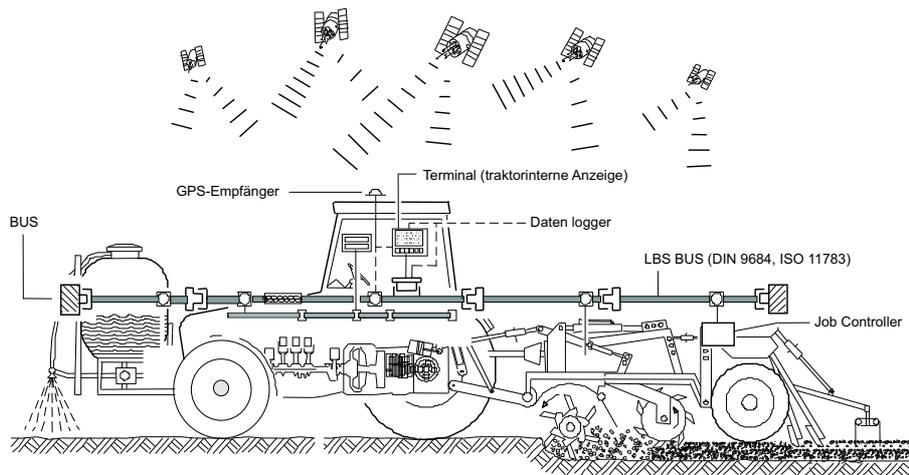


Abbildung 6.2: Übersicht - Landwirtschaftliches BUS System, [AUERNHAMMER, 1995]

Diese aus den Einzelkomponenten unterschiedlicher Herkunft zusammengefügte Technologie deckt nahezu den gesamten Anwendungsbereich aller anfallenden Arbeitsschritte zur landwirtschaftlichen Bodenbearbeitung ab. Die einzelnen Applikationen werden in Fachkreisen folgendermaßen aufgeteilt:

- **Flottenmanagement** und **Zielsuche** (wichtig bei Lohnunternehmen und Maschinenvereinigungen),
- **Teilschlagtechnik** (Herbizid-, Fungizid- und Pestizidbekämpfung sowie Düngung),
- **automatische Datenerfassung** (Erfassung des Bodenzustandes, Ertragskartierung, DGM-Erstellung, Feldgrenzen, Dokumentation der einzelnen Bodenbearbeitungen - wichtig für die Erstellung von Jahresbilanzen, Abrechnungen, Registrierung der Maschinenlaufzeiten) und
- **Feldrobotik** (autonome Fahrzeugführung, Fahrzeugtrabanten oder mechanische Unkrautbekämpfung).

In Zukunft sollen so genannte „Decision Support Systems, DSS“ (softwarebasierte Modelle zur Unterstützung der Entscheidungsfindung im Kommunikationssystem) und „Economic and Ecologic Evaluations Systems, EEES“ (softwarebasierte Modelle zur ökonomischen und ökologischen Beurteilung dieser Entscheidungen) die Intelligenz von Precision Farming Systemen noch zusätzlich verbessern und die Einsatzbereiche erweitern.

Darüber hinaus kann man diese Arbeiten der reinen **Ortung** (Ziel- oder Spurführungssystem mit grafischer Ausgabe der gegenwärtigen Position zur Solltrajektorie) und der **autonomen Fahrzeugnavigation** zuordnen. Die Verfügbarkeit der GPS-Position in Echtzeit, d. h. ohne oder mit bekannten Latenzzeiten, ist jedoch bei beiden Aufgaben zwingend erforderlich.

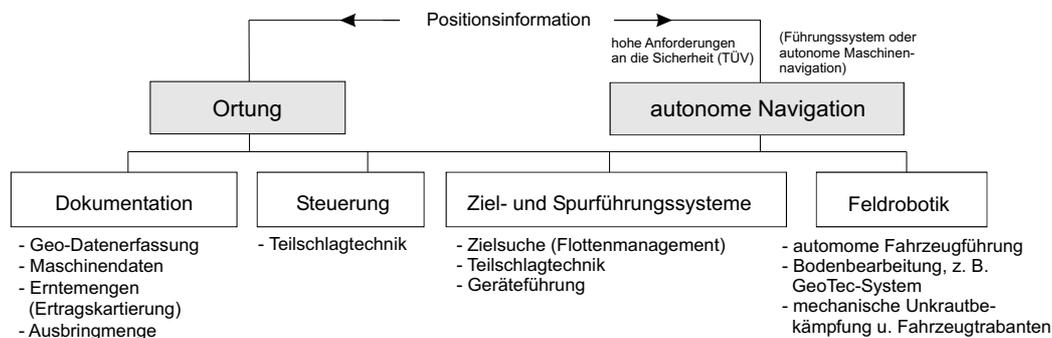


Abbildung 6.3: Aufteilung der landwirtschaftlichen Applikationen in Ortungs- und Navigationsaufgaben

Genauigkeitsanforderung - Aufgabenbereich	Applikation
± 10 m - Zielsuche	Flottenmanagement und Einsatzplanung
$\pm 1,0$ m - Bodenbearbeitung, Arbeitsdokumentation und Teilschlagtechnik	Ertragskartierung, georeferenzierte Erfassung von Herbizid-, Pestizid- und Fungizideinsatz, Bodendüngung
$\pm 0,1$ m - Fahrzeugführung, Spurführungssysteme und Datenerfassung	Bodenbearbeitung, Flächenaufmaß, DGM-Erstellung
$\pm 0,01$ m - Feldrobotik	mechanische Unkrautbekämpfung

Tabelle 6.1: GPS-abhängige Genauigkeitsklassen in Precision Farming, [STEMPFHUBER, 2002]

Durch die Genauigkeitsbereiche der GPS-Empfänger (stand-alone, DGPS und RTKGPS) mit Positionsgenauigkeiten von einigen etwa 10 m bis zu wenigen Zentimetern lassen sich diese Aufgaben in verschiedene Gruppen zuordnen.

Mittlerweile sind über 10 % aller Mähdrescher mit Ertragskartierungssystemen ausgestattet. Die Verbreitung der teilschlagspezifischen Flächenbewirtschaftung liegt jedoch im Bundesgebiet noch unter 1 %, was hauptsächlich auf die mangelnde Praxiserfahrung zurückzuführen ist. Komplettsysteme zur Bearbeitung des Boden- und Pflanzenzustandes innerhalb eines Arbeitsganges existieren in der Praxis noch nicht oder nur sehr begrenzt. So zeigt das Beispiel aus der Abbildung (6.4) eine mögliche teilschlagspezifische Bodendüngung mit der gleichzeitigen Erfassung des Pflanzenzustandes (Berücksichtigung der Ablage aus der geometrischen Anordnung, lokales Auswertesystem).

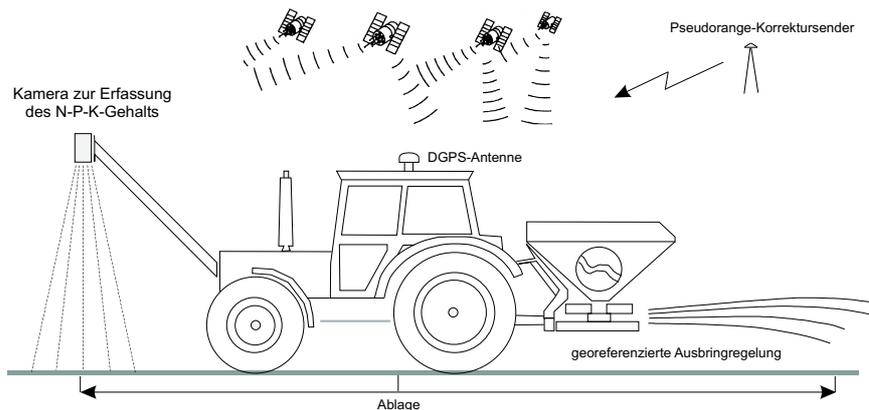


Abbildung 6.4: Beispiel eines Gesamtsystems zur teilschlagspezifischen Düngung, [JÜRSCHIK, 1999]

Im dem deutschlandweit angelegten interdisziplinären Forschungs- und Entwicklungsverbundprojekt mit der Bezeichnung „**preagro**“, (siehe <http://www.preagro.de>) soll die Teilschlagbewirtschaftung mithilfe der Satellitenortung als Managementsystem zur Praxisreife geführt werden. Dieses vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMPF) geförderte Projekt soll die Hersteller von Precision Farming Systemen mit den einzelnen Forschungsinstitutionen vereinen. Ein weiteres langjährig angelegtes Forschungsprojekt bildet die Plattform „Forschungsverbund Agrarökosysteme München, FAM“ (siehe. <http://fam.weihenstephan.de>).

6.2 Aufgabenstellung im Teilprojekt FAM LT2 und LQ3

In den beiden abgeschlossenen FAM-Teilprojekten LT2 und LQ3 mit dem Kurztitel „**Technik und Qualität**“ lag der Themenschwerpunkt in der Beurteilung der Qualität von teilschlagvariierter Applikationen. Ziel der beiden zweieinhalbjährigen Forschungsprojekte war es, die zur Übertragung der Teilschlagbewirtschaftung notwendigen **Kennwerte** der **Ortungs- und Applikationstechnik** zu bestimmen und hinsichtlich der Art, Größe und des Verhaltens zu untersuchen. Außerdem sollten die **Reaktionszeiten** von Teil- und Gesamtsystemen bewertet werden. Die Bearbeitung der beiden FAM-Teilprojekte wurde gemeinsam am Lehrstuhl für Geodäsie und

dem Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung (beide an der TU München) durchgeführt. Die auf der Basis des genormten LBS aufgebauten Ausbringregelungen waren Hauptgegenstand der einzelnen Untersuchungen. Des Weiteren war das verwendete kinematische Ortungssystem GPS qualitativ und quantitativ für den erforderlichen Einsatz zu untersuchen. Um eine systematische Vorgehensweise zu gewährleisten, wurden zunächst sämtliche Fehler des Positionierungssystems bestimmt und bewertet. Hierzu ist der Aufbau einer **hoch präzisen Orts- und Zeitreferenz** auf der Basis eines RTKGPS und eines zielverfolgenden Servotachymeters erforderlich. In weiteren Schritten sollte dann mithilfe von CAN-fähigen Analysewerkzeugen der Datenstrom im LBS auf mögliche Zeitverzögerungen und Übertragungsfehler überprüft werden.

Als Versuchsgelände für LT2 und LQ3 wurden das Klostergut Scheyern (<http://fam.weihenstephan.de>) und die Versuchsstation Dürnast (<http://wdl.weihenstephan.de/forsch/Durnast.html>, Informationssystem kleinräumige Bestandesführung Dürnast, IKB-Dürnast) ausgewählt. Die notwendigen Einrichtungen, Maschinen und Precision Farming Komponenten standen den beiden Teilprojekten bis auf wenige Ausnahmen ständig zur Verfügung. Die Ergebnisse während der Laufzeit des Projektes wurden in den Jahresberichten 2000, 2001 und 2002 [STEMPFHUBER et al., 2000, 2001 u. 2002] sowie in einem Abschlussbericht [STEMPFHUBER et al., 2004] zusammengefasst und veröffentlicht (). Der Lehrstuhl für Geodäsie beschränkte sich bei der Mitarbeit an diesen beiden Teilprojekten hauptsächlich auf die Untersuchung, Bewertung und Verbesserung der Echtzeitpositionierung. Viele für das Teilprojekt LT2 und LQ3 durchgeführten Arbeiten und Untersuchungen bildeten die Grundlage der vorliegenden Promotion. Anhand von praktischen Anforderungen des Projekts konnten die wissenschaftlichen Fragestellungen definiert und diskutiert werden.

6.3 Kalibrierung des Ortungssystems

Die in den Kapiteln 2 (Echtzeit-Datenerfassungssystem, Abb. 2.9), 3 (Zeit- und Positionsgenauigkeit von GPS-Beobachtungen) und 4 (Kalibrierungssystem für zielverfolgende Servotachymeter bzgl. fehlerfreier kinematischer Anwendungen) erläuterten Sachverhalte bilden die Grundlage des verwendeten Referenzsystems zur Untersuchung der Positionsgenauigkeit sowie der Echtzeitfähigkeit. Dieses kombinierte, echtzeitfähige Messsystem (in Kapitel 5 ausführlich beschrieben) mit einer Positionsgenauigkeit im Zentimeterbereich wurde als Referenzsystem zur Verifizierung der Teilschlagtechnik in den beiden Teilprojekten LT2 und LQ3 angewandt.

Das im Kapitel 1 unter der Abbildung (1.3) allgemein definierte Modell zur Verifizierung von Ingenieurnavigation- und Steuerungsaufgaben kann als Ausgangssystem ohne Modifikation direkt auf diese Aufgabenstellung von LT2 und LQ3 angepasst werden.

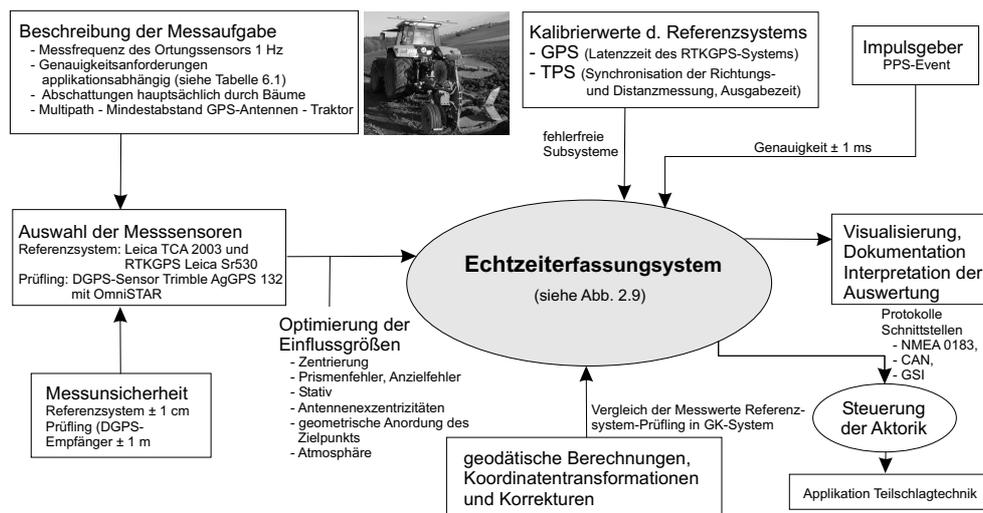


Abbildung 6.5: Konzept zur Kalibrierung des Gesamtsystems

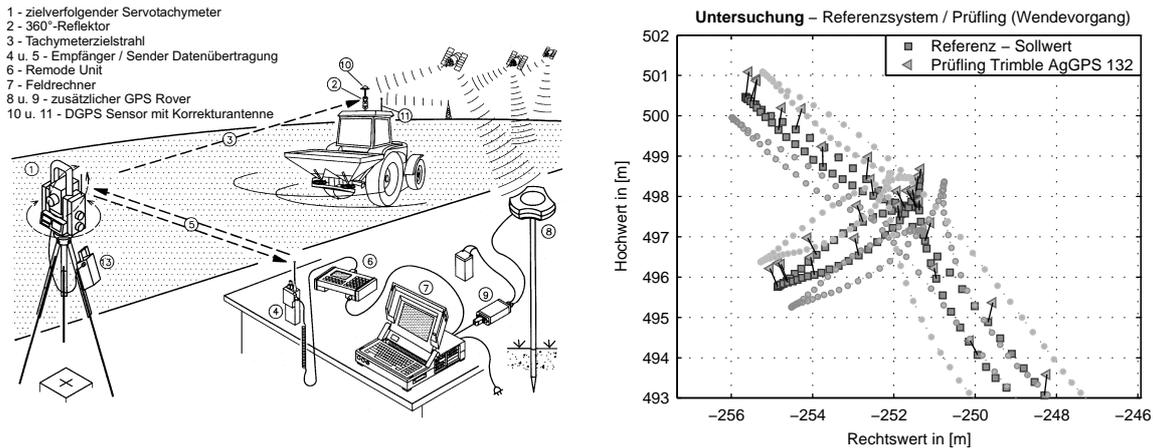


Abbildung 6.6: Konzept im Teilprojekt LT2 und LQ3, linke Übersicht aus [STEINMAYR, et al., 2000]

Die Bestimmung der Latenzzeit Δt_{Out} für landwirtschaftliche Echtzeitapplikationen mit GPS kann innerhalb einer statischen Untersuchungsreihe problemlos durchgeführt werden. Kinematische Messungen zur Bestimmung von Δt_{Out} ergaben eine signifikanten Unterschiede. Die Beurteilung der Positionsgenauigkeiten erfordert neben den allgemeinen GPS-Einflussgrößen eine Berücksichtigung der unter Absatz (3.3) dargestellten Vorgehensweise. Hierbei ist die Geometrieordnung des Positionssensors zum Fußpunkt durch Neigung, Ablage und Orientierung zu berücksichtigen (vgl. Abb. 3.27).

6.4 Ergebnisdarstellung

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnittes erwähnt, wurden die Ergebnisse der beiden Teilprojekte LT2 und LQ3 im jeweiligen Jahresbericht bzw. Abschlussbericht veröffentlicht. Die Vorgehensweise zur Lösung der Aufgabenstellung wurde in der gesamten Arbeit ausführlich dargestellt und diskutiert. So listet z. B. die Tabelle (3.5) die Ergebnisse der Latenzzeitbestimmung einzelner untersuchter GPS-Empfänger auf. Die Ergebnisse sind jedoch ausschließlich mit der angegebenen Konfiguration bzw. Firmwareversion übertragbar. Die verschiedenen Latenzzeiten des GPS-Referenzsystems sind unter Tabelle (3.6), die des zielverfolgenden Servotachymeters unter Tabelle (4.1) angegeben. Die Eliminierung von systematischen Fehlereinflüssen durch eine unzureichende Synchronisation der Subsysteme ist für das Referenzsystem aus dem zielverfolgenden Servotachymeter und die Empfänger für RTKGPS-Messungen zwingend erforderlich. Für die Echtzeitsteuerung während der Applikation bedeutet dies, dass die Positionsinformation $P_i(X_i, Y_i, Z_i)$ um diesen Wert verzögert zur Verfügung steht. Dies muss unter Berücksichtigung der Orientierung mit der Funktion

$$f_i(\Delta t, \vec{v}_i^{3-D}) = Abl_{\Delta t} = \Delta t \cdot \vec{v}_i^{3-D}$$

verbessert werden.

Das Verhalten der Positionsgenauigkeit bei GPS wird hauptsächlich von der Güte des Empfängers, der Art der differentiellen Korrektur und der verfügbaren Satellitengeometrie beeinflusst. Wegen der stetigen Weiterentwicklung neuer Empfängertechnologien, Korrekturmedien und zusätzlicher Satelliten (GPS BlockIIR, BlockIII, GALILEO und der Aufrüstung von GLONASS) sind diese Ergebnisse einer ständigen Verbesserung unterworfen. Das Vorgehen bei solchen aufwändigen Untersuchungsreihen kinematischer Positionsgenauigkeiten wurde jedoch ausführlich aufgezeigt. Einige ausgewählte Beispiele zu stand-alone, DGPS und RTKGPS Anwendung wurden dargestellt. Die jeweilige Filterung der code- oder phasengeglätteten Pseudorange-Messung sowie integrierter Positionfilter (Land-, Wasser- oder Luftanwendungen) ist dabei zu berücksichtigen.

7 Schlussbemerkung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde, die Problematik kinematischer Messungen mit GPS und dem zielverfolgenden Servotachymeter behandelt. Manuelle Beobachtungen von bewegten Objekten gab es in der Vergangenheit schon immer. Die Entwicklungen im Bereich der Satellitenortung sowie der Integration von Bildverarbeitungssystemen bei zielverfolgenden Servotachymetern ermöglichen seit einigen Jahren nun auch vollkommen automatisierte Systeme zur Beobachtung immer schnellerer Objektbewegungen. Da diese Entwicklungen auf herkömmliche Vermessungsgeräte aufgesetzt wurden, sind vor allem bei Echtzeitanwendungen zeitkritische Aspekte zu berücksichtigen.

Neben den bekannten Instrumentenprüfungen für GPS-Empfänger und zielverfolgende Servotachymeter sind neue Kalibrierungsmethoden zur Minimierung systematischer Fehlereinflüsse kinematischer Messungen erforderlich. Mittlerweile wurde die Notwendigkeit kinematischer Messmethoden erkannt, so dass die Diskussion bzgl. neuer Kalibrierungsstrategien hinsichtlich der Zeit- und Ortsinformation in verschiedenen Institutionen und Fachgremien eine zunehmende Rolle spielt. Auch nationale und internationale Standardisierungs- und Normungsausschüsse befassen sich intensiver mit dieser Problematik.

Kalibrierungsanlagen zur Eliminierung von Zeit- und Positionsfehlern kinematischer Messsensoren erfordern die Verfügbarkeit von fehlerfreien dreidimensionalen Sollinformationen, d. h. Lage- und Höheninformationen sowie einer Zeitreferenz. In dieser Arbeit wurden konzeptionelle Kalibrierungsmethoden für verschiedene Anforderungen und Genauigkeitsklassen geschaffen. Der Anwender kinematischer Messmittel muss unter Berücksichtigung seiner Bewegungsgrößen (Geschwindigkeit, Art und Richtung der Bewegung) und der Genauigkeitsanforderungen das Kalibrierungsverfahren vor dem Einsatz des Messinstruments auswählen und die zeitkritischen Parameter, wie die verschiedenen Latenzzeiten oder die Synchronisation einzelner Subsysteme berücksichtigen. Hierbei soll die vorliegende Arbeit eine Hilfestellung geben. Des Weiteren ist die Sensibilisierung der Instrumentenhersteller für dieses Themengebiet erforderlich.

Ziel dieser Arbeit war es nicht, eine Kalibrierungsanlage wie z. B. bei der Nivellierlatten- oder GPS-Antennenkalibrierung zu schaffen, sondern die Grundlagen mit Lösungsansätzen darzustellen. Eine wissenschaftliche Anschlussarbeit zur Realisierung dieser Kalibrierungsansätze für GPS und zielverfolgende Servotachymeter ist wünschenswert und wegen der raschen Verbreitung dieser Technologie zwingend erforderlich. Dabei ist verstärkt auf die Unterscheidung der Komponenten- und Systemkalibrierung (sowohl bei GPS als auch beim zielverfolgenden Servotachymeter) einzugehen. Das Endergebnis einer solchen Arbeit müsste ein zertifiziertes Prüfprotokoll mit Angaben des Leistungspotentials und reproduzierbaren Ergebnisdarstellungen hinsichtlich kinematischer Anwendungen sein.

Sicherlich werden in naher Zukunft neue Entwicklungen im Bereich der globalen und terrestrischen Empfänger- und Sensortechnik wie der Datenübertragung und -verarbeitung angestrebt. Hierbei nehmen zweifellos die geplanten Neuerungen in den satellitengestützten Systemen wie Galileo oder WAAS/Egnos eine zentrale Bedeutung ein. Von seiten der Instrumentenhersteller wird sicherlich in Zukunft versucht werden, die kinematischen Fehlereinflüsse zu reduzieren. Gegenwärtig ist jedoch durch die Integration von Zusatzroutinen (wie z. B. durch die permanenten Überprüfungsfunktionen beim Leica SR530 Empfänger durch den ClearTrakTM-Algorithmus) bei Firmware-updates ein Anstieg der Tot- und Latenzzeiten nachzuweisen.

Da man bei wissenschaftlichen Arbeiten mit GPS-Echtzeitanwendungen ohne Eingriff in die Hard- und Software (Firmware) immer nur auf die Ausgabe des NMEA-Protokolls beschränkt ist, wäre zukünftig eine Verwendung von offenen Entwicklungsumgebungen (z. B. Development Kit und Receiver-Module der Fa. Fastrax, <http://www.fastrax.fi>) zur Anpassung von zeitkritischen Navigationsaufgaben enorm wichtig. Hierbei könnten Berechnungs-, Auswerte- und Filteralgorithmen gezielt entwickelt und an die Anforderungen der Applikation adaptiert werden. Wegen der Komplexität dieser Aufgabe wäre eine wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Anwendung von teilschlagspezifischer Flächenbewirtschaftung und Spurführungssystemen im Dezimeterbereich vielversprechend.

Weltweit werden GPS und zielverfolgende Servotachymeter für die unterschiedlichsten Positionierungs- und Navigationsaufgaben eingesetzt. Die Diskussion dieser Problemstellung auf internationaler Ebene ist jedoch bisher nur in sehr begrenztem Maße erfolgt. Aus diesem Grund ist die globale Darstellung dieser Ergebnisse notwendig, um eine umfassende Diskussion zur Kalibrierung und Synchronisierung kinematischer Messsensoren anzuregen.

8 Verzeichnis der wichtigsten Formelzeichen

\underline{A}	Systemmatrix
Abl_{Δ}	geometrische Ablage aus Δt
a_0, a_1, a_2	Korrelationskoeffizienten für Stand, Gang und Alterung der Satellitenzeitskala
$a_{ATR,1}, a_{ATR,2}, b_{ATR,1}$	Parameter der Affintransformation
\underline{B}	Steuermatrix
$b_{ATR,2}$	(Übergang vom Pixelsystem ins Teilkreisssystem der Winkelmessung)
B_{DMS} u. L_{DMS}	geografische Breite und Länge in Grad, Minuten u. Sekunden
B_{GRD} u. L_{GRD}	geografische Breite und Länge in Grad (dezimal)
B_{NMEA} u. L_{NMEA}	geografische Breite und Länge im NMEA-Format
\underline{C}	Beobachtungsmatrix
c	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum
c_{iono}	Ionosphärenmodell
c_K	Fehler, verursacht durch die mittlere Erdkrümmung
c_{mp}	Fehler aufgrund von Multipath
c_{noise}	Signalrauschen
c_{trop}	Troposphärenmodell
\underline{D}	Durchgangsmatrix
E	Länge einer Bewegungspur
e	Partialdruck des Wasserdampfes
f	Frequenz
$f_{abstast}$	Abtastfrequenz
f_{max}	maximal auftretende Frequenz
f_{Mess}	Messfrequenz
f_N	Nyquist-Frequenz
$max F_{Pos}$	maximal auftretender Positionsfehler
H	relative Feuchte in [%]
h_E	instrumentelle Signalverzögerung im Empfänger
H_{Ell}	ellipsoidische Höhe
H_{Korr}	Höhenkorrektur bzgl. der Refraktion und der Erdkrümmung
h_S	instrumentelle Signalverzögerung im Satellit
\underline{K}	Korrekturmatrix
k_L	Refraktionskoeffizient
l	Länge der Basislinie
\underline{N}	Kovarianzmatrix des Messrauschens
n	Brechungsindex
\vec{n}	Messrauschen
p	absoluter Druck
$P_{D,i}(Y_{D,i}, X_{D,i}, Z_{D,i})$	fiktive (unbekannte) Position der Distanzmessung zur Epoche i
P_E^S	Pseudorange zwischen Satellit und Empfänger
$P_E(X_{E,i}, Y_{E,i}, Z_{E,i})$	unbekannte Empfängerposition auf der Erdoberfläche zur Epoche i
$P_{err,i}$	fehlerhafte Position aus der unzureichend synchronisierten Winkel- und Distanzmessung
$P_{F,i}$	fiktive (unbekannte) Position der Richtungsmessung zur Epoche i in 2-D
$P_{GPS,k}$	GPS-Spur
$P_{i,j}$	Pixel einer Bildszene in i (vertikal) und j (horizontal)
$P_E^N(X_E^N, Y_E^N, Z_E^N)$	Näherungskordinate des GPS-Empfängers

$P'_{r,i}$	um die Latenzzeit verfälschte Position
$P_{r,i}(Y_{r,i}, X_{r,i}, Z_{r,i})$	fiktive (unbekannte) Position der Richtungsmessung zur Epoche i
$P_{RS232,i}$	Position des Prismas zum Zeitpunkt der Positionsausgabe
$P^S(X^{S,i}, Y^{S,i}, Z^{S,i})$	Ortsvektor des Satellitenorbits zur Epoche i
$P_{TPS}(Y_{TPS}, X_{TPS}, Z_{TPS})$	Standpunkt des zielverfolgenden Servotachymeters
$P(x_i, y_i, z_i)$	aktuelle Position zur Epoche i
$PR_{E,ber}^S$	Pseudorange-Beobachtung (rechnerisch korrigierte, zwischen dem Satellit S und dem GPS-Empfänger E)
$PR_{E,gem}^S$	gemessene Signallaufzeit zwischen dem Satellit S und dem GPS-Empfänger E
$PR_{E,Ref,Rov}^{S,i}$	Pseudorangedifferenz zwischen Satellit
$PR_{Ref}^{S,i}$	Pseudorange zwischen Satellit S_i und der Referenzstation
$PR_{Rov}^{S,i}$	Pseudorange zwischen Satellit S_i und der Roverstation
Q	Kovarianzmatrix des Schätzfehlers
R, R_0, C und C_0	Rahmen des CCD-Systems
R_E^S	geometrische Entfernung zwischen Empfänger und Satellit
r_i	Horizontalrichtung
$R_{Ref}^{S,i}$	wahre geometrische Entfernung zwischen Satellit S_i und Empfänger (Referenz)
$R_{Rov}^{S,i}$	wahre geometrische Entfernung zwischen Satellit S_i und Empfänger (Rover)
$r(t_i)$	Richtungsmessung zum Zeitpunkt t_i
$\vec{r}_t(x_t, y_t, z_t)$	Ortsvektor einer Messepoche zum Zeitpunkt t
r_{zentr}	Schwerpunkt der CCD-Bildszene in Horizontalrichtung
S	Weg des GPS-Signals
s	empirische Standardabweichung = mittlere Fehler einer Beobachtung
$S'_{D,i}$	Strecke der Distanzmessung aus dem Zielstrahl des Tachymeters
$S_{D,i}$	Schrägdistanz
$S_D(t_i)$	Distanzmessung zum Zeitpunkt t_i
S_E^N	Entfernung zwischen dem Satellit und der Näherungskordinate im Empfänger
$S'_{F,i}$	Differenz zwischen der Richtungs- und Distanzmessung
S_i und Empfänger E	
$S'_{r,i}$	Strecke der Richtungsmessung aus dem Zielstrahl des Tachymeters
$S(Y, X, Z)$	dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem (Linkssystem)
T	Absoluttemperatur
tt	Empfängerzeitpunkt (time tag)
T_A	GPS-Zeit im Empfänger A
T_B	GPS-Zeit im Empfänger B
t_{Ber}	Dauer der Positionsberechnung in Abhängigkeit der Informationsmenge
T_b	Referenzzeit im UTC(SU)-Zeitsystem für die Ephemeriden
T_0	Referenzzeitpunkt (aktuelle GPS-Epoche)
T_0^S	Sendezeitpunkt im Satelliten
t_{Begin}^{Data}	Beginn der Zeitmarke einer Datenübertragung
t_{End}^{Data}	Ende der Zeitmarke einer Datenübertragung
$t_{D,i}$	Zeitpunkt der Distanzmessung der Epoche i
$T_{EDM,Begin}$	Beginn der Distanzmessung einer Messepoche i
$T_{EDM,End}$	Ende der Distanzmessung einer Messepoche i
TEC	Total Electron Content
$\bar{t}_{F,i}$	Richtungswinkel im orientierten Messsystem
T_f	Messfrequenz bei Tachymeterbeobachtungen
T_{GPS}	GPS-Systemzeit

$T_{GLONASS}$	GLONASS-Systemzeit
$t_{GLONASS}^S$	Zeitpunkt der Signalausendung im GLONASS-Satellit S
t_{korr}	Dauer der GPS-Empfängerkorrekturen
t_{Out}	Dauer der kompletten Datenausgabe
$t_{out,i}$	Ausgabezeitpunkt der Tachymetermessungen
t_{PPS}^{PC}	PC-Zeitstempel des PPS-Impuls
t_{String}^{PC}	PC-Zeitstempel der Datenzeile (erster String)
t_{PPS}	Zeitpunkt des PPS-Events im PC
$t_{RS232,i}$	Zeitpunkt der Positionsausgabe der Epoche i
$t_{radial,i}$	Zeitpunkt der radialen Kompensatorkorrektur
$t_{tangential,i}$	Zeitpunkt der tangentialen Kompensatorkorrektur
$\bar{t}_{r,i}$	Richtungswinkel im Ausgangssystem
$t_{r,i}$	Zeitpunkt der Richtungsmessung der Epoche i
T_i^S	aktuelle Zeit im Satellit i
T_{UTC}	Zeitpunkt im UTC-Zeitsystem
$t_{\zeta,i}$	Zeitpunkt der Zenitwinkelmessung der Epoche i
UTC_k	Systemzeit, k für die unterschiedlichen Stationen (z. B. SU oder USNO)
\vec{u}	Steuervektor
\underline{V}	Kovarianzmatrix des Systemrauschens
v	Bewegungsgeschwindigkeit
\vec{v}	Systemrauschen
\hat{v}	Verbesserungsvektor
$v_{F,i}$	Geschwindigkeit einer Prismenbewegung
$v_{F,i}^H, v_{F,i}^R$	Geschwindigkeit des Bewegungssimulators Hin- und Rückfahrt
v_{max}	maximal auftretende Bewegungsgeschwindigkeit
\vec{x}	Zustandsvektor
$(X_{Ref}, Y_{Ref}, Z_{Ref})$	Koordinaten der Referenzstation
$(X_{Rov}^{korr}, Y_{Rov}^{korr}, Z_{Rov}^{korr})$	Koordinaten der Pseudorange-korrigierten Roverstation
$\hat{Y}, \hat{X}, \hat{Z}$	Koordinaten der fehlerhaften Position
z^I	Zenitdistanz zum Satelliten S
$\alpha_{r,i}$	Zwischenwinkel der falschen Position
γ_n	relative Abweichung der Trägerfrequenz des GLONASS Satelliten n
Δl_i	Länge eines Vektors aus zwei Punkten
ΔP_{TPS}^{3-D}	3-D-Messunsicherheit TPS
ΔR_{ION}	ionosphärischer Laufzeitfehler
ΔR_{TRO}	troposphärischer Laufzeitfehler
Δs	systematischer Positionsfehler bei kinematischen Beobachtungen
Δt	Latenzzeit kinematischer Messungen
ΔT_{UTC}^A	Differenz der Empfängerzeit A zur UTC-Zeitskala
ΔT_{GPS}^A	Differenz der Empfängerzeit A zur GPS-Zeitskala
ΔT_B^A	Zeitdifferenz zweier unterschiedlicher GPS-Empfänger A und B
ΔT_{GPS}^B	Differenz der Empfängerzeit B zur GPS-Zeitskala
ΔT_{UTC}^B	Differenz der Empfängerzeit B zur UTC-Zeitskala
$\Delta t_{Cal,i}$	Dauer der Berechnung einer einzelnen Tachymetermessung
$\Delta t_{D,r}$	Latenzzeit zwischen Richtungs- und Distanzmessung
$\Delta t_{D,r,i}$	unterschiedliche Niveaus der Latenzzeit

ΔT^E	aktuelle Zeit im GPS-Empfänger
ΔT_E	Fehler der Empfängeruhr
ΔT_{Ref}^E	Zeitfehler in der Referenzstation
ΔT_{Rov}^E	Zeitfehler in der Roverstation
ΔT_E^S	Uhrensynchronisationsfehler zwischen Satelliten- und Empfängeruhr
Δt_{Out}^E	Wert der Latenzzeit
$\Delta t_{Out,i}^E$	unterschiedliche Niveaus der Latenzzeiten
$\Delta T_{GPS, GLONASS}$	Zeitunterschied GPS-Zeitskala zur GLONASS-Zeitskala
$\Delta T_{GPS, UTC}$	Zeitdifferenz zwischen der GPS-Systemzeit der UTC _{USNO} -Zeit
$\Delta t_{k,i}$	Zeitdifferenz unterschiedlicher Zeitlaboratorien im Ort k bezogen auf die Messepoche i
ΔT_{Mess}	Zeitunterschied zweier aufeinanderfolgender Messepochen
ΔT_P	Zeitoffset wegen Polschwankung
Δt^{PC}	Differenz der PC-Zeit
$\Delta t_{r, \zeta}$	Latenzzeit zwischen Richtungs- und Zenitwinkelmessung
ΔT_S	Seasonal Variations
ΔT^S	Fehler der Satellitenuhr
ΔT_{GPS}^S	Zeitdifferenz zwischen der allgemeinen GPS-Zeit und der GPS-Zeit im Satellit S
$\Delta T_{Rov}^{S,i}$	Zeitdifferenz zwischen dem ausgesendeten Signal im Satellit S_i und der Roverstation
$\Delta t_{Sig,i}$	Zeitintervall PPS-Signal
Δt_T	Totzeit
ΔT_{UTC}^A	Differenz zwischen einem Zeitpunkt im GPS-Empfänger und der UTC-Zeit
$\Delta \vec{v}_i^{3-D(RTK-DGPS)}$	3-D Ablagevektor bei GPS-Genauigkeitsbetrachtungen (entspricht $\Delta PPRE$)
$\Delta \hat{x}$	Vektor aller Unbekannten einer vermittelnden Ausgleichung
$(\Delta X_E, \Delta Y_E, \Delta Z_E)$	Koordinatenzuschlägen zur Näherungsposition des GPS-Empfängers
$\Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i}, \Delta Y_{r,i}$	Verbesserungsvektor zwischen $P'_{r,i}$ und $P_{r,i}$
$\Delta \tau_{Ion}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der ionosphärischen Signalrefraktion
$\Delta \tau_{Rx}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der Signalverzögerung im Empfänger E
$\Delta \tau_{Sag}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der Erddrehung (Sagnac-Effekt)
$\Delta \tau_{Sig,i}$	Synchronisationsfehler des PPS-Signals aus zwei unterschiedlichen Empfängern
$\Delta \tau_{Trop}$	Laufzeitkorrektur aufgrund der troposphärischen Signalrefraktion
$\Delta HPRE$	Höhengenauigkeit bei GPS Untersuchungen
$\Delta PPRE$	3-D-Positionsgenauigkeit bei GPS Untersuchungen
$\Delta UPRE$	Lagegenauigkeit bei GPS Untersuchungen
$\delta \vec{l}$	Basislinienfehler bei DGPS-Messungen
$\delta \vec{O}$	Orbitfehler der GPS Satelliten
δs	Signallaufzeit
δS_{Sensor}	δS_{Sensor} 1σ Positionsfehler
$\epsilon(i)$	Messepoche i
$\epsilon(t_i)$	Messepoche zum Zeitpunkt t_i
$\zeta_{F,i}$	Zenitwinkel aus $S'_{F,i}$
ζ_i	Vertikalrichtung
$\zeta_{r,i}$	Zenitwinkel zur richtigen Position
$\zeta(t_i)$	Zenitwinkelmessung zum Zeitpunkt t_i
ζ_S	Zenitrichtung zum Satelliten S
ζ_{zentr}	Schwerpunkt der CCD-Bildszene in Vertikalrichtung
$\lambda_{L1,L2}$	Wellenlänge der beiden Trägerphasen im L1/2-Band
ξ_{wahr}	wahrer Wert
σ	theoretische Standardabweichung

$\sigma(\text{GPS})$	Positionsgenauigkeit GPS (2-D oder 3-D)
$\sigma(\text{TPS})$	Positionsgenauigkeit TPS (2-D oder 3-D)
$\sigma(\text{GPS-TPS})$	Positionsgenauigkeit des synchronisierten Gesamtsystems (GPS, TPS)
τ_u	Empfängeruhrzeitfehler
τ_s	Schaltsekunden zwischen der UTC- und der GPS-Systemzeit
τ_c	Zeitkorrektur GLONASS-Zeitsystem
$\tau_n(T_b)$	Korrektur der Satellitenzeit relativ zum GLONASS-Zeitsystem
$\Phi_E^{S,i}(L1, L2)$	reellwertige Mehrdeutigkeiten bei GPS-Trägerphasenmessungen
$\omega(t_i), \zeta(t_i), r(t_i)$	Rotationen um drei Achsen eines kartesischen Koordinatensystems zum Zeitpunkt t_i

9 Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen

ATR	Automatic-Target Recognition
CAN	Controller Area Network
CCD	Charge Couple Device
DCF77	Deutscher Langwellensender Frankfurt
DGPS	Differentielles GPS
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft e. V.
DOP	Dilution of Precision
DVW	Deutscher Verein für Vermessungswesen e. V.
EDM	Elektronischer Distanzmesser
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
FAM	Forschungsverbund Agrarökosysteme
FARA	Fast Ambiguity Resolution Approach
FoV	Field of View
GLONASS	Global Navigation Satellites System
GUM	Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HIGGINS	Hybrides INS-GPS-GLONASS System
LAGPS	Local Area GPS-Dienste
LBS	Landwirtschaftliches BUS System
IERS	International Earth Rotation Service
IGS	Internationaler GPS Service
INS	Inertial Navigation System
ION STD 101	Institute of Navigation, Recommended Test Procedures for GPS
ISO	International Organisation for Standardization
NAVSTAR GPS	Navigation System with Time and Ranging, Global Positioning System
NMEA	Standard for Interfacing Marine Electronics Devices der National Marine Electronics Association
PTB	Physikalisch Technische Bundesanstalt
PZO	Phasenzentrumsoffset
PZV	Phasenzentrumsvariation
RINEX	Receiver Independent Exchange format
RoI	Region of Interest
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services Special Commission
RTKGPS	Real Time Kinematic GPS
SA	Selective/Availability
SPP	Single Point Positioning
TAI	Internationale Atomzeit
TPS	Terrestrisches Positionierungssystem
UT	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
WADGPS	Wide Area DGPS-Dienste
WGS84	World Geodetic System 1984

10 Verzeichnis der Abbildungen und der Tabellen

Abbildungsverzeichnis

1.1	Einsatzphasen und Aufgaben der Ingenieurgeodäsie, [WUNDERLICH, 2003]	7
1.2	Abschätzung des maximalen Positionsfehlers in Abhängigkeit von Δt und v	9
1.3	Gesamtsystem eines geodätischen Echtzeitsystems für Aufgaben der Ingenieurnavigation oder Steuerung	13
1.4	kinematische Messungen an einem Sollkreis mit dem Leica TCA 1800, [STAIGER, 1998]	16
2.1	Übersicht der wichtigsten Zeitsysteme für geodätische Beobachtungen	22
2.2	Zeitunterschiede $T_{GPS} - UTC_{SU}$ und $T_{GLONASS}$ nach [LEWANDOWSKI et al., 1997]	23
2.3	Übersicht der Interferenzbildung von Boden- und Raumwellen an den Flanken des Langwellensignals	24
2.4	Signalrauschen in einer Entfernung von 350 km / Einfluss eines Gewitters während der Beobachtung	24
2.5	NAVSTAR GPS-Satellitenstatus vom 05.12.03	25
2.6	PPS-Event eines GPS-Empfängers	26
2.7	Variation der Empfängeruhr	28
2.8	Fehler in der Satellitenuhr $\Delta T^{S,18}$	28
2.9	Log-File einer geodätischen Echtzeitbeobachtung / Datenerfassungssystem	30
2.10	Schnittstellenabfrage mit dem Betriebssystem Windows 98 und Windows 2000, K6 - 350 MHz . .	31
2.11	Drift der PC Uhr	31
2.12	Genauigkeitsuntersuchung des Erfassungssystems mit PPS-Event Trigger	32
2.13	Zeitversatz zweier unterschiedlich berechneter PPS-Events	32
3.1	Zusammenhang des zulässigen Orbitfehlers mit dem Alter und der Genauigkeit der Ephemeriden	34
3.2	Höhenprofil der Elektronenverteilung in der Erdatmosphäre (Standardmodell)	35
3.3	systematische Positionsfehler der DGPS Beobachtungen, u. a. durch die PZV	37
3.4	Struktur der NMEA-0183 Sentences	38
3.5	Vergleich unterschiedlicher GPS-Empfänger im stand-alone Mode	40
3.6	Pseudorange-Korrektur Referenz- zur Roverstation	40
3.7	Vergleich identischer Messungen mit unterschiedlichen Korrekturinformationen am Leica SR530 .	42
3.8	Vergleich der Pseudorange-Korrekturen an ausgewählten vier Satelliten	43
3.9	Positionsgenauigkeit statischer DGPS-Messungen	43
3.10	fehlerhaft berechnete DGPS-Positionen beim Garmin eTrex	44
3.11	RTKGPS-Genauigkeit an einem geometrisch bekannten Sollkreis (ideale äußere Bedingungen) . .	45
3.12	Überprüfung der konstanten Basis auf einer mobilen Arbeitsmaschine	46
3.13	Signal- und Positionsvergleich statischer und kinematischer GPS-Messungen	46
3.14	Beschreibung der Satellitenbahn durch die Kepler-Elemente (6 Parameter)	47
3.15	polares Sichtbarkeitsdiagramm München, Hammerfest, Lagos und Kapstadt	47
3.16	Latenzzeitbestimmung des Signalempfangs (volle UTC-Epoche und NMEA-Ausgabe)	48
3.17	Verhalten der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 1 Hz)	49
3.18	Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 1 Hz)	49
3.19	Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Leica SR530 (Messfrequenz 10 Hz)	50
3.20	Homogenität der Latenzzeit Δt_{Out}^E , Trimble AgGPS132 (Messfrequenz 1 Hz)	50
3.21	Verteilung der Latenzzeit Δt_{Out}^E gleicher Beobachtungen mit unterschiedlichen GPS-Empfängern	51
3.22	identische Beobachtungen zur Bestimmung der Latenzzeit Δt_{Out}^E in Abhängigkeit der Satellitenanzahl	51
3.23	grafische Darstellung der einzelnen Latenzzeiten Δt_{Out}^E	53
3.24	Latenzzeit Δt_{Out}^E Leica SR530 Ausgabeoption - „volle Epoche“ -	53
3.25	Latenzzeit Δt_{Out}^E Garmin eTrex mit Pseudorange-korrigierten Strecken	54
3.26	Latenzzeit Δt_{Out}^E mit Rohdatenspeicherung des Leica SR530 in Abhängigkeit der Satellitenanzahl	54
3.27	Untersuchungsarten kinematischer Genauigkeitsbetrachtung bei GPS	56
3.28	DGPS Positionsuntersuchungen während einer landwirtschaftlichen Applikation	56

3.29 kinematische Genauigkeitsuntersuchung des Trimble AgGPS132 GPS-Empfängers (0,5 m Abstufung)	57
3.30 kinematisches Positionsrauschen während der landw. Bodenbearbeitung (Messfrequenz 1 Hz)	58
3.31 GPS-Höhengenaugigkeit <i>kinematisch</i> (unterschiedliche Darstellungsformen)	58
3.32 Untersuchung der Initialisierung (Init TTFF - Warm TTFF), Trimble AgGPS132-Empfänger	59
3.33 Untersuchung der Initialisierung von zwei SR530 Empfängern mit einer gemeinsamen Antenne	60
4.1 grundlegendes Funktionsprinzip zielverfolgender Servotachymeter	62
4.2 Tachymeterstandpunkt in Bezug zum bewegten Prisma	63
4.3 Darstellung der einzelnen Messelemente an den Bewegungen a.) und e.)	64
4.4 Größe des CCD-Arrays / digi. Prismenspot - Abstand 3,00 m / digi. Bild der CCD-Kamera	65
4.5 Bildauswertung des Leica TCA2003 mit zwei unterschiedlichen Entfernungen	66
4.6 Ablaufdiagramm einer automatischen Zielverfolgung	67
4.7 on-board Applikation / Client-Server Applikation	68
4.8 Messrate mit dem TCRA1101plus / Daten-Logfile	68
4.9 Messrate zweier unterschiedlicher GeoCOM-Funktionen bei „stop-and-go“-Beobachtungen	69
4.10 verschiedene Abtastverfahren zur autom. Teilkreisablesung, [ZEISKE, 1999]	70
4.11 systematische Verfälschung der Kompensatorwerte während der Zielverfolgung	71
4.12 Anordnung zur Genauigkeitsuntersuchung eines 360°-Reflektors	71
4.13 Abweichungen des GRZ4 360°-Reflektors von Leica, [STEMPFHUBER, 1998]	72
4.14 Auswirkung der Erdkrümmung auf die Höhenkomponente - <i>Simulationsrechnung</i>	72
4.15 Vergleich GPS-Tachymeterhöhen / Differenz	73
4.16 Zeitverhalten bei einer kinematischen EDM-Messung	74
4.17 Genauigkeit der kinematischen Distanzmessung bei Leica TCA2003 im Tracking-Mode	74
4.18 systematischer Positionsfehler durch unzureichende Synchronisation der Subsysteme - <i>linear</i>	75
4.19 Messanordnung und Bewegungsspur der Abbildung (4.18)	76
4.20 systematischer Positionsfehler durch unzureichende Synchronisation der Subsysteme - <i>kreisförmig</i>	76
4.21 systematischer Positionsfehler horizontaler Bewegungen wegen der Latenzzeit $\Delta t_{D,r} \neq 0$	77
4.22 Auswirkung des Zeitoffsets bei verschiedenen geometrischen Anordnungen	77
4.23 Messepoche einer nichtsynchronisierten Winkel- und Distanzmessung	78
4.24 Bewegungssimulatoren des Geodätischen Prüflabors	81
4.25 Messanordnung und unkorrigierte Spur zur Bestimmung von $t_{D,r}$ an der Hommelbank	81
4.26 korrigierte Tachymeterbeobachtungen / Bewegungsgeschwindigkeit - Hommelbank	82
4.27 korrigierte Tachymeterbeobachtungen beliebiger Bewegungsformen (Leica TCA2003, GeoBasic)	83
4.28 Trajektorie aus dem Leica RTKGPS SR530 und dem Leica TCA2003 (Untersuchungen im FAM-Projekt)	84
4.29 zeitliches Verhalten von $t_{D,i}$ und $t_{r,i}$ des Leica TCA2003 Tachymeters mit GeoBasic	86
4.30 Zeitverzögerung der RS232-Ausgabe während der Datenausgabe	86
4.31 Kriterium zur Zuordnung von $\Delta t_{D,r,j}$ / Zeitverzögerung durch die RS232-Ausgabe	87
4.32 um $\Delta t_{D,r,j}$ korrigierte und geglättete Tachymeterpositionen des Leica TCA2003, Lage	87
4.33 um $\Delta t_{D,r,j}$ korrigierte und geglättete Tachymeterpositionen des Leica TCA2003, Höhe	88
4.34 Modell - Kalibrierungsanlage für zielverfolgende Servotachymeter	88
4.35 Bilder der temporären Kalibrierungsanlage am Geodätischen Prüflabor - Eichenau	88
4.36 Geometrie und Führungsgenaugigkeit des Bewegungssimulators	89
4.37 Zeitmarken des Leica TCRA1101plus mit dem GeoCOM-Befehl <code>TMC_GetQuickDist{}</code>	89
4.38 Ergebnisse an der Kalibrierungseinrichtung mit dem Leica TCRA1101plus	90
4.39 Ergebnisse an der Kalibrierungseinrichtung mit dem Leica TCRA1101plus	90
5.1 automatisches Wiederauffinden des Prismas bei einem Signalabriss	93
5.2 physikalisches Modell der GPS-/TPS-Sensorfusion	94
5.3 GPS-TPS-Positionen mit Zeitinformation im transformierten Auswertesystem	95
5.4 verschiedene Bewegungssimulatoren zur Untersuchung von GPS- und TPS-Sensoren	96
5.5 GPS-/TPS-Kalibrierung an einer kreisförmigen Solltrajektorie	97
5.6 Problem der schleifenden Schnitte bei der Kalibrierung (Simulationsrechnung)	98
5.7 Schienensystem zur Kalibrierung des Gesamtsystems (München Boschetsrieder Str.)	98
5.8 Genauigkeiten am Versuchsaufbau zur Kalibrierung des Gesamtsystems	99

5.9	Vergleich TPS- (Hin-Rückmessung) und GPS- mit TPS-Messungen GeoBasic	100
5.10	Zustandsschätzung in einem gestörten dynamischen System	100
5.11	kaskadierendes System mit unabhängigen Vor- und Haupt-Kalman-Filter [STERNBERG, 1998] .	102
5.12	Konzept zur Synchronisation kinematischer Messungen mit verschiedenen Sensoren	102
5.13	Ausgleichsfunktion zur Kombination von GPS- und TPS-Messungen Simulation	103
5.14	Endergebnis der Sensorfusion aus GPS und TPS	103
6.1	GPS-Fahrgassenanalyse, [AUERNHAMMER, 1995]	106
6.2	Übersicht - Landwirtschaftliches BUS System, [AUERNHAMMER, 1995]	107
6.3	Aufteilung der landwirtschaftlichen Applikationen in Ortungs- und Navigationsaufgaben	107
6.4	Beispiel eines Gesamtsystems zur teilschlagspezifischen Düngung, [JÜRSCHIK, 1999]	108
6.5	Konzept zur Kalibrierung des Gesamtsystems	109
6.6	Konzept im Teilprojekt LT2 und LQ3, linke Übersicht aus [STEINMAYR, et al., 2000]	110

Tabellenverzeichnis

1.1	Einflussfaktoren beim zielverfolgenden Servotachymeter (zeitkritische Komponenten hervorgehoben)	15
2.1	Beispiel einiger Stationen lokaler Zeitobservatorien - Ablagen UTC zu UTC_k	21
2.2	Vergleich der wichtigsten Zeitübertragungssysteme	29
2.3	Rechnerleistung und Drift des PC-Quarzes ($y = m \cdot x + t$, $y = \Delta t$ und $x = \text{Beobachtungszeit}$)	31
3.1	GLONASS Satellitenstatus vom 05.12.03	33
3.2	Quasi-Geoidhöhe für die angegebene Position nach [DENKER, 1989]	39
3.3	Beispiel der RTCM-Korrekturdaten einer identischen Epoche ZCNT 1380, Mittelwert Diff. = 14,36 m	42
3.4	GPS-Genauigkeitsdarstellung, Terminologie aus dem ION STD 101	44
3.5	Ergebnis der Latenzzeitbestimmung des Trimble AgGPS132 mit OmniSTAR DGPS	52
3.6	Ergebnis der Latenzzeitbestimmung Δt_{Out}^E des Leica SR530 GPS-Empfängers	52
3.7	Genauigkeitsmaß zur Abb. (3.29), Terminologie aus dem ION STD 101 Standard	57
3.8	Init TTFE der vorhergehenden Untersuchungsreihe	59
3.9	Init TTFE der vorhergehenden Untersuchungsreihe	60
4.1	Bestimmung der Latenzzeit $\Delta t_{D,r}$ an der Hommelbank des Geodätischen Prüflabors	83
5.1	Zusammenfassung der relevanten Kalibrierungsansätze und Einflussgrößen für eine Sensorfusion	96
6.1	GPS-abhängige Genauigkeitsklassen in Precision Farming, [STEMPFHUBER, 2002]	108

11 Literaturverzeichnis

Literatur

- [ABOUSALEM et al., 2001] **Abousalem, M.**: *Ashtech Instant-RTK: A Revolutionary Solution for Surveying Professionals*, The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, FIG Symposium Cairo.
- [ALLAN et al., 1981] **Allan, D. W., ASHBY, N., DECHER, R., VESSOR, R. F. C. u. WINKLER, G.**: *Ultra-Accurate International Time and Frequenz Comparison via an Orbit Hydrogen-Master Clock*, Proc. 3rd Freq. Stand. Metrol., Aussois, S. 396-414.
- [ALLAN u. WEISS, 1980] **Allan, D. W. u. Weiss, M. A.**: *Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite*, Proc. 34th Annu. Symp. Freq. Control. (ASFC), Ft. Monmouth, NJ, S. 334-346.
- [AUERNHAMMER u. MUHR, 1991] **Auernhammer, H. u. Muhr, T.**: *The Use of GPS in Agriculture for Yield Mapping an Tractor Implement Guidance*, DGON '91, First International Symposium, Real Time Differential Application of the Global Positioning System, Verlag TÜV Rheinlang.
- [AUERNHAMMER u. SCHÖN, 1993] **Auernhammer, H. u. Schön, H.**: *Landwirtschaftliches BUS System -LBS, Normung und Stand der Realisierung*, Kuratorium für technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., KTBL, Darmstadt.
- [AUERNHAMMER, 1995] **Auernhammer, H.**: *Landwirtschaftliche Betriebsführung mit GPS*, DGON Seminar SATNAV 95, Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen, Freising/Weihenstephan.
- [BAYER, HECK u. MÖNICKE, 1989] **Bayer, G., Heck, U. u. Mönicke, H.-J.**: *Einsatz einer CCD-Kamera bei der Objekterkennung mittels Motortheodolit*, Allgemeine Vermessungsnachrichten 11-12, Wichmann Verlag Karlsruhe, S. 423 - 430.
- [BAYER, 1992] **Bayer, G.**: *Führung langsam bewegter Objekte mit Zielverfolgungssystemen*, Dissertation, DGK-Reihe C, Heft 398.
- [BAYER, 1997] **Bayer, G.**: *Dynamic Aspects of the TCA1800 Automatic Total Station*, In: A. Gruen, H. Kahmen [Hrsg.]: *Optical 3-D Measurement Techniques IV*, Wichmann Verlag, Karlsruhe.
- [BEDRICH, 1998] **Bedrich, S.**: *Hochgenaue satellitengestützte Zeitübertragung mit PRARE*, Scientific Technical Report STR98/24, GeoForschungszentrum Potsdam.
- [BEUTLER, 1996] **Beutler, G.**: *GPS Satellite Orbits*, In: Kleusberg, A., P.J.G Teunissen (Hrsg.): *GPS for Geodesy*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- [BITTNER, 2000] **Bittner, G.**: *Autonome Fahrzeuge - Aufbau und erste Erfahrungsberichte*, DGON - Symposium, Ortung und Navigation, GALILEO, Freising/Weihenstephan, S. 177 - 189.
- [BLOMENHOFER u. JACOB, 1995] **Blomenhofer, H. u. Jacob, T.**: *GPS Availability und Integrity bei Präzisionsanflügen und automatischen Landungen*, DGON Seminar SATNAV 95, Satellitennavigationssysteme - Grundlagen und Anwendungen, Freising/Weihenstephan.
- [BOCK u. LEPPARD, 1989] **Bock, Y. u. Leppard, N.**: *Global Positioning System: An Overview*, International Association of Geodesy Symposia, No. 102, Springer Verlag New York, Berlin, Heidelberg.
- [BREUER et al., 1993] **Breuer, B., Campbell, J. u. Müller, A.**: *Mess- und Auswerteverfahren unter operationellen GPS-Bedingungen*, SPN - Zeitschrift für satellitengestützte Positionierung, Navigation und Kommunikation, S. 82 - 90.
- [BRONSTEIN u. SEMENDJAJEW 1991] **Bronstein, I. N., u. Semendjajew, K. A.**: *Taschenbuch der Mathematik*, 25. Auflage, Verlag Nauka Moskau.

- [BULOWSKI, 2000] **Bulowski, T.:** *GPS-Anwendungen bei der RWE Rheinbraun AG im Tagebau Garzweiler (GPS-Bagger)*, DVW Schriftenreihe 44/2001, GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmung und RTK-Anwendungen, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 85 - 93.
- [CASPARY, 2002] **Caspary, W.:** *Kinematische Messmethoden*, ZfV, 5/2002, S. 281 - 290.
- [CHALUPA, 1997] **Chalupa, J.:** *Kalibrierung von CCD-Kameras in motorisierten Theoliten*, Dipolarbeit: Institut für Landesvermessung und Ingenieurgeodäsie, Technische Universität Wien.
- [CZAJA, et al., 2001] **Czaja, J., Neuhierl, T. u. Stempfhuber, W.:** *Hybrides Messsystem zur kinematischen Positionierung von Schiffen*, AVN 11-12/2001, S. 374 - 380.
- [CZAJA u. HAMBERGER, 2001] **Czaja, J. u. Hamberger, J.:** *Navigation und Einmessung mit DGPS im Wald*, AFZ-Der Wald 25/2001, S. 1327 - 1330.
- [CZICHOS, 1989] **Czichos, H.:** *Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften*, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 29. Auflage.
- [DENKER, 1989] **Denker, H.:** *A New Gravimetric Quasigeoid for the Federal Republic of Germany*, DGK-Reihe B, Heft Nr. 291.
- [DEUMLICH u. STAIGER, 2002] **Deumlich, F. u. Staiger, R.:** *Instrumentenkunde der Vermessungstechnik, 9. Auflage*, Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- [DITTRICH u. KÜHMSTEDT, 2000] **Dittrich, J. u. Kühmstedt E.:** *Höhere DGPS-Genauigkeit bei ALF-Positionierungen mit der Azimuth-Distance-Correction (ADCo)*, DGON-Tagungsband, Ortung und Navigation GALILEO 2000, S. 63 - 69.
- [DÖLLER, 1994] **Döller, H.:** *Kriterien zur Echtzeiterfassung für GIS mit dem Global Positioning System*, AGIT'94 Tagungsband Heft 21, Institut für Geographie und angewandte Geoinformatik, Universität Salzburg.
- [EHLERT, 1998] **Ehlert, D.:** *Beiträge zur teilschlagspezifischen Bewirtschaftung*, Bornimer Agrartechnische Berichte Heft 20.
- [EHL, et al. 2002] **Ehrl, M., Demmel, M., Auernhammer, H., Stempfhuber, W. u. Maurer, W.:** *Spatio-Temporal Quality of Precision Farming Applications*, ASAE Chicago, Paper No. 023084.
- [EHSANI, 2002] **Ehsani, R.:** *Elements of a Dynamic GPS Test Standard*, ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress, Chicago.
- [EISSFELLER, 2002] **Eissfeller, B.:** *Stand und Zukunft von GPS*, DVW Schriftenreihe 44/2002, GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmung und RTK-Anwendungen, S. 9 - 18.
- [EL-SHEIMY, 1996] **El-Sheimy, N.:** *The Development of VISAT-A Mobile Survey System for GIS Application*, UCGE Report 20/21, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Canada.
- [EULER u. LANDAU, 1992] **Euler, H.-J. u. Landau, H.:** *Fast GPS Ambiguity Resolution On-The-Fly For Real-Time-Applications*, Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning, Columbus, Ohio, S. 363 - 370.
- [EULER u. ZIEGLER, 2000] **Euler, H.-J. u. Ziegler, Ch.:** *Advances in Ambiguity Resolution for Surveying Type Applications*, ION GPS 2000 Proceedings, Salt Lake City, USA.
- [FEIST, 1998] **Feist, W.:** *Elta S 10 und Elta S20 von Carl Zeiss, Systemtachymeter einer neuen Generation*, Vermessungswesen und Raumordnung 60, S. 104 - 127.
- [FREI, 1991] **Frei, E.:** *Rapid Differential Positioning with the Global Positioning System (GPS)*, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, Schweizerische geodätische Kommission, Band 44.
- [FRENCH, 1994] **French, R.:** *The Continuing Evolution of Vehicular Navigation*, DGON '94, 3rd International Conference on Land Vehicle Navigation, Dresden, S. 1-5.

- [FRIEDE, 2000] **Friede, O.:** *Ein hybrides Messsystem zur Kalibrierung von Strichteilungen*, DKG-Reihe C, Heft Nr. 521.
- [GEIGER, 1988] **Geiger, A.:** *Genauigkeitssteigerung bei kurzzeitigen-statischen und kinematischen Satellitenmessungen bis hin zur Echtzeitanwendung*, DGK-Reihe C, Heft Nr. 458.
- [GIANNIOU, 1996] **Gianniou, M.:** *Einfluss und Bestimmung der Variabilität des Phasenzentrums von GPS-Antennen*, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Mitteilungen Nr. 43.
- [GÖRRES, 2001] **Görres, B.:** *Zur Kalibrierung der GPS-Antennen*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 206 - 221.
- [GOTTWALD, 1998] **Gottwald, R.:** *Prüfung und Kalibrierung von Vermessungsinstrumenten - Grundsätzliche Überlegungen und Konzepte*, Vermessung, Photogrammetrie Kulturtechnik (VPK), S. 409-413.
- [GRÜN u. KAHMEN, 2001] **Grün, A. u. Kahmen, H.:** *Optical 3-D Measurement Techniques V*, Department of Applied and Engineering Geodesy, Institute of Geodesy and Geophysics.
- [GUM, 1995] : *International Standardisation Organisation*, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Geneva, ISO.
- [GURTNER, 1994] **Gurtner, H.:** *The Receiver-Independent Exchange Format*, GPS World July 1994, S. 48 - 52.
- [HAMBERGER, 2001] **Hamberger, J.:** *GPS als Mittel zum umweltschonenden Maschineneinsatz: Navigation von Forstmaschinen und Dokumentation ihrer Fahrbewegungen*, Dissertation am Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der TU München.
- [HEISKANEN u. MORITZ, 1967] **Heiskanen, W. u. Moritz, H.:** *Physical Geodesy*, W. H. Freeman and Company, San Francisco and London.
- [HEINE, 1999] **Heine, K.:** *Beschreibung von Deformationsprozessen durch Volterra- und Fuzzy-Modellen sowie Neuronale Netze*, DGK-Reihe C, Heft Nr. 516.
- [HEISTER, 2001] **Heister, H.:** *Zur Angabe der Messunsicherheit in der geodätischen Messtechnik*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 108 - 119.
- [HENNES, 1999] **Hennes, M.:** *Grundlegende Aspekte zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robottachymetern*, AVN 106, S. 374 - 385.
- [HENNES u. FAVRE, 2000] **Hennes, M. u. Favre, C.:** *Zum Einfluss der geometrischen Ausrichtung von 360°-Reflektoren bei Messungen mit automatischer Zielerfassung*, VPK 2/00, S. 72 - 78.
- [HENNES u. KRICKEL, 2000] **Hennes, M. u. Krickel, B.:** *Zur Entwicklung von Untersuchungsverfahren zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit von Robot-Tachymetern*, Tagungsband: Flächenmanagement und Bodenordnung (FuB), S. 26 - 33.
- [HENNES u. INGENSAND, 2000] **Hennes, M. u. Ingensand, H.:** *Komponentenkalibrierung versus Systemkalibrierung*, In: Schnädelbach, K. Schilcher, M. [Hrsg.]: Ingenieurmesskurs 2000 XIII. International Course on Engineering Surveying, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 166 - 177.
- [HETZEL, 1993] **Hetzl, P.:** *Zeitinformation un Normalfrequenz von der PTB über den Telekom-Langwellensender DCF77*, Telekom Praxis, Heft 1, S. 25 - 36.
- [HEUNECKE, 1995] **Heunecke, O.:** *Zur Identifikation und Verifizierung von Deformationen mittels adaptiver KALMAN-Filterung (Hannoversches Filtern)*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Nr. 208.
- [HEUNECKE, 2003] **Heunecke, O.:** *DIN 18710 Ingenieurvermessung, Teil 4: Überwachung - der Normenentwurf liegt vor*, AVN, Heft 1, S. 28 - 33.

- [HOFFMANN-WELLENHOF, et al. 2001] **Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H. u. Collins, J.:** *Global Positioning System, Theory and Practice*, Springer Verlag Wien, New York.
- [HOPFIELD, 1971] **Hopfield, H.:** *Troposphere Range Error at the Zenith*, Committee on Space Research, 14th Plenary Meeting, Working Group 1, The Johns Hopkins University Maryland.
- [HUEP, 1986] **Huep, W.:** *Zur Positionsschätzung im gestörten KALMAN-Filter am Beispiel eines manövrierenden Wasserfahrzeuges*, Disseratation an der Universität Hannover, Nr. 143.
- [ICD-GLONASS, 1995] : *Global Navigation Satellite System Interface Control Document*, Coordinational Scientific Information Center of Russia Space Force (KNITs VKS), Moskau, Russland.
- [ICD-GPS, 1997] : *Global Interface Control Document ICD-GPS-200*, Revision C, USA.
- [ILLNER, 2002] **Illner, M.:** *RTK-Messungen für genaue Ingenieur Anwendungen*, DVW Schriftenreihe 44/2002, GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen, Wittwer Verlag, S. 47 - 64.
- [INGENSAND, 2001] **Ingensand, H.:** *Systematische Einflüsse auf praktische Messungen mit dem Tachymeter und Digitalnivellier*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 120 - 137.
- [INOUE 2003] **Inoue, K., Kise, W., Murakam, N. u. Miyaura, S.:** *Guidance System for Farm Work using GPS and Adaptive Control Method for Autonomous Tractor*, GNSS 2003, The European Navigation Conference, Graz, Austria, S. 239 - 252.
- [INSTITUTE OF NAVIGATION, 1997] **Institute of Navigation Standards: Recommended test Procedures for GPS Receiver**, ION STD 101, Alexandria, VA: ION.
- [JOECKEL u. STOBER, 1999] **Joeckel, R. u. Stober, M.:** *Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung*, 4., neubearbeitete u. erweiterte Auflage, Wittwer-Verlag Stuttgart.
- [JÜRSCHIK, 1999] **Deutsche Landwirtschaftliche Gesellschaft, Gebbrauchswertprüfung: Teilschlagspezifische Düngung, Grundlagen, Konzepte, technische Lösungen**, DLG Merkplblatt 315, Gebrauchswertprüfung, ATB Potsdam-Bornim.
- [KAHMEN u. SUHRE, 1983] **Kahmen, H. u. Suhre, H.:** *Ein lernfähiges tachymeterische Vermessungssystem zur Überwachung kinematischer Vorgänge ohne Beobachter*, ZfV 108, S. 345 - 351.
- [KAHMEN, 1984] **Kahmen, H.:** *Selbsttätig zielende tachymetrische Vermessungssysteme für Aufgaben der Ingenieurgeodäsie*, IX. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Dümmler Verlag, Bonn, Band 1, A2/1 - A2/10.
- [KAHMEN u. STEUDEL, 1988] **Kahmen, H. u. Steudel, J.:** *Das automatisch zielende Meßsystem GEO-ROBOT II*, Ingenieurvermessung Dümmler Verlag, Bonn.
- [KAHMEN, 1990] **Kahmen, H.:** *Robot Techniques and their Impact on Surveying Systems*, International Association of Geodesy Symposia, No. 108, Springer Verlag New York, Berlin, Heidelberg, S. 100 - 113.
- [KAHMEN, 1993] **Kahmen, H.:** *Vermessungskunde*, de Gruyter Verlag Berlin, New York.
- [KALMAN, 1960] **Kalman, R. E.:** *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, Translation of the ASME Series D, Band 82 - Journal of basic Engineering, S. 35 - 35.
- [KAPLAN, 1996] **Kaplan, E. D.:** *Understanding GPS, Principles and Applications*, Artech House, Bostan, London.
- [KATOWSKI, 1989] **Katowski, O.:** *Deformationsmessungen an Bauwerken mit dem automatischen Theodolitmesssystem ATMS*, In: A. Gruen, H. Kahmen [Hrsg.]: *Optical 3-D Measurement Techniques*, Wichmann Verlag, Karlsruhe, S. 393 - 403.
- [KIRCHNER, 1991] **Kirchner, D.:** *Two-Way Time Transfer Via Communication Satellite*, Proc. IEEE 79(7), S. 983 - 990.

- [KÜGLER, 2001] **Kügler, D.:** *Luftfahrtnavigation - vom Funkfeuer zur Satellitennavigation*, DGON Journal 2/2001.
- [KUHLMANN, 1999] **Kuhlmann, H.:** *Sensorik - zielverfolgender Tachymeter*, Mitteilungen des Landesvereins Baden-Württemberg des DVW, 46 Jahrgang, Heft 2, Stuttgart.
- [LACHAPELLE u. SCHWARZ, 1990] **Lachapelle, G. u. Schwarz, K.-P.:** *Kinematic Systems in Geodesy, Surveying an Remote Sensing*, International Association of Geodesy Symposia, No. 107, Springer Verlag New York, Berlin, Heidelberg.
- [LANGLEY, 1995] **Langley, R. B.:** *NMEA 0183: A GPS Receiver Interface Standard*, GPS World July 1995.
- [LANYI u. ROTH, 1988] **Lanyi, G. E. u. Roth, T.:** *A comparison of mapped an measured total ionospheric electron content using global positioning system and beacon satellete observation*, Radio Science, 23., S. 1041 - 1044.
- [LEICA GEOSYSTEMS, 2003] **Leica Geosystems AG:** *Leitfaden für die statische und kinematische GPS Vermessung*, <http://www.leica-geosystems.com>.
- [LEICA GEOSYSTEMS, 2003] **Leica Geosystems AG:** *Leitfaden zu SKI-Pro*, <http://www.leica-geosystems.com>.
- [LESCHIUTTA, 1991] **Leschiutta, S.:** *Time Synchronization Using Laser Techniques*, Proc. IEEE 79(7), S. 1001-1008.
- [LEWANDOWSKI u. THOMAS, 1991] **Lewandowski, W. u. Thomas. C.:** *GPS Time Transfer*, Proc. IEEE 79, S. 991 - 1000.
- [LEWANDOWSKI et al., 1996] **Lewandowski, W., DANAHER, J. u. KLEPCZYNSKI, W. J.:** *GLO-NASS Common-View Time Transfer Between North Amerika ans Europe and its Comparison with GPS*, Proc. 10th Eur. Freq. Time Forum (EFTF), Brighthon S. 388 - 392.
- [LEWANDOWSKI et al., 1997] **Lewandowski, W., Azoubis, J., De Jong, G., Nawrocki, J. u. Danaher, J.:** *A New Approach to International Satellite Time and Frequency Comparisons; All-in-View, Multichannel GPS-GLONASS Observations*, 10th International Technical Meeting ION GPS-97, Kansas City, USA.
- [LINSLEY u. BAUER, 1929] **Linsley, C. M. u. Bauer, F. C.:** *Test your soil for acidity*, Agricultural Experiment Station Circular No. 346. Urbana, Ill., University of Illinois.
- [MATHES, 1998] **Mathes, A.:** *GPS und GLONAS als Teil eines Hybriden Messsystem in der Geodäsie am Beispiel des Systems HIGGINS*, DGK-Reihe C, Heft Nr. 500.
- [MATROX, 1999] **Matrox Electronic Systems:** *Matrox Meteror-II Installation and Hardware Reference*, Handbuch.
- [MATSAKIS, 1999] **Matsakis, D. N.:** *Analysis Noise, Short-Baseline Time Transfer, and a Long-Baseline GPS Carrier-Phase Frequency Scale*, 31st Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, S. 491 - 504.
- [MATTHIAS, 1991] **Matthias, H.:** *Der Robotertheodolit TOPOMAT*, Technik, Anwendungen und Auswirkungen auf dem Beruf. Vermessung Photogrammetrie und Kultur, Helt 8/91, S. 427 - 431.
- [MAURER, 1983] **Maurer, W.:** *Ein interferometrisches Messverfahren zur Bestimmung von Strichverbesserungen an eingebauten Theodolitteilungen*, Dissertation TU München.
- [PELZER, 1988] **Pelzer, H.:** *Anwendungen der Kalman-Filter-Technik auf die Deformationsanalyse*, Beiträge zum X. Internationalen Kurs für Ingenieurvermessung, Band 1, Bonn.
- [RADOVANOVIC u. TESKEY, 2001] **Radovanovic, R. u. Teskey, W.:** *Dynamic Monitoring of Deforming Structures: GPS versus Robotic Tacheometry Systems*, The 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, Orange, California, S. 61 - 70.

- [RINNER, 1984] **Rinner, K.:** *Positionsbestimmung für Ingenieurvermessung*, IX. Int. Kurs für Ingenieurvermessung, Band 3 Bonn, Dümmler Verlag S. 19 - 25.
- [ROTHACHER, 1992] **Rothacher, M.:** *Orbit of Satellite Systems in Space Geodesy*, Schweizer Geodätische Kommission, Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz Band 46.
- [ROTHACHER, 1995] **Rothacher, M.:** *Determination of Antenna Phase Center Variations Using GPS Data*, Proceedings 1995, IGS Workshop, Potsdam, S. 205 - 220.
- [ROTHACHER, 2000] **Rothacher, M.:** *Tutorial „Einführung in GPS“*, 3. SAPOS-Symposium, München.
- [ROTHACHER, 2002] **Rothacher, M.:** *Vergleich verschiedener Kalibrierungsmethoden für die Empfänger- und Satellitenantennen*, DVW Schriftenreihe 44/2002, GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmungen und RTK-Anwendungen, Wittwer Verlag Stuttgart, Beilage.
- [SCHIRMER, 1994] **Schirmer, W.:** *Universaltheodolit und CCD-Kamera - ein unpersönliches Meßsystem für geodätisch-astronomische Bestimmungen*, DGK-Reihe C, Nr. 427.
- [SCHLEMMER, 1989] **Schlemmer, W.:** *Anforderungen, Stand und Entwicklung von Industrie-Messsystemen*, ZfV 7-8/1989, S. 365 - 372.
- [SCHLÜTER, 1988] **Schlüter, W.:** *Zeit und Frequenz im Messverfahren der Geodäsie*, DGK-Reihe C, Heft Nr. 337.
- [SCHNÄDELBACH, 1996] **Schnädelbach, K.:** *Vorlesungsmanuskript zur Vermessungskunde 5*, Geodätisches Institut der Technischen Universität München.
- [SCHNEIDER, 1988] **Schneider, M.:** *Satellitengeodäsie Grundlagen*, Wissenschaftsverlag Mannheim, Wien, Zürich.
- [SCHRICK, 1977] **Schrick, K.:** *Anwendung der Kalman-Filtertechnik*, Wien.
- [SCHWARZ, 1981] **Schwarz, H.:** *Optimale Regelung und Filterung*, Akademie-Verlag, Berlin.
- [SCHWARZ, 1996] **Schwarz, W.:** *Kinematische Sensoren - Klassifizierung und Leistungsfähigkeit*, DVW Schriftenreihe 22/1996, Kinematische Messmethoden in der Ingenieur- und Industrievermessung, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 54 - 97.
- [SCHWARZ, 2001] **Schwarz, W.:** *Geodätische Laborkalibrierung - Stand der Technik*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 44 - 69.
- [SCHWENKE, 2001] **Schwenke, T.:** *Experimentelle Untersuchungen von Koppelortungssystemen für GPS auf der Basis von Mikrowellensensoren im landwirtschaftlichen Einsatz*, Dissertation am Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung am Wissenschaftszentrum Weihenstephan.
- [SEEBER, 1993] **Seeber, G.:** *Satellite Geodesy, 2nd Edition*, Walter de Gruyter Verlag, Berlin.
- [SEIDELMANN, 1992] **Seidelmann, K.:** *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac*, University Science Books, Mill Valley, California.
- [SÖHNE, 1996] **Söhne, W.:** *Ein hybrides System in der Geodäsie Einsatz de NAVSTAR GPS mit dem Strapdown-Inertial-Navigationssystem LASERNAV II für kinematische Punktbestimmung und Orientierung*, DKG-Reihe C, Heft Nr. 463.
- [SPANGLER, 2001] **Spangler, A.:** *Die LBS Programmbibliothek - erstes Open Source Modell in der Landwirtschaft*, Berichte der GIL Band 13, Berlin/Weihenstephan.
- [STAIGER, 1997] **Staiger, R.:** *Verfahren der automatischen Zielpunktserfassung und -verfolgung*, DVW Schriftenreihe 29/1998, Hybride Vermessungssysteme - Grundlagen und Anwendungen -, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 13 - 27.
- [STAIGER, 1998] **Staiger, R.:** *Zur Überprüfung moderner Vermessungsinstrumente*, AVN 105, S. 365 - 372.

- [STAIGER, 2001] **Staiger, R.:** *Motivation und Strategie zur Prüfung geodätischer Instrumente*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 44 - 69.
- [STARKER et al., 1990] **Starker, S., Arko, D., Hammeshahr, J., Nau, H., Sappl, E., Schild, H., Schimmel, R. u. Stelzel, F.:** *Navigation Experiment NAVEX on Splacelab Mission D1*, Final Report, DLR Oberpfaffenhofen.
- [STEIN, 1982] **Stein, V.:** *Modell zur ionosphärischen Elektronenverteilung zur Korrektur von Ausbreitungsfehlern elektromagnetischer Wellen*, Mitteilungen 82-03, DFVLR, Köln.
- [STEINMAYR, et al., 2000] **Steinmayr, T., Auernhammer, H., Maurer, W., Demmel, M., Stempfhuber, W., Schwenke, T. u. Römer, H. P.:** *First evaluation of the applicability of infrared-tracking-systems for examining the accuracy of DGPS in field works.*, In: Proceedings 28. International Symposium on Agricultural Engineering. Opatija-Kroatien, S. 53 - 61.
- [STEMPFHUBER, 1998] **Stempfhuber, W.:** *Kinematische Vermessung mit zielverfolgendem Tachymeter und GPS*, unveröffentlichte Diplomarbeit, TU München, Geodätisches Institut.
- [STEMPFHUBER, 1999] **Stempfhuber, W.:** *Kinematische Vermessung mit dem zielverfolgenden Tachymeter*, In: Bill, R. [Hrsg.]: *Sensorsysteme im Precision Farming*, Universität Rostock, Fachbereich Landeskultur und Umweltschutz, S. 121 - 132.
- [STEMPFHUBER u. SCHNÄDELBACH, 2000] **Stempfhuber, W. u. Schnädelbach, K.:** *Genaue Positionierung von bewegten Objekten mit zielverfolgenden Tachymetern*, In: Schnädelbach, K. u. Schilcher, M. [Hrsg.]: *Ingenieurmesskurs 2000, XIII. International Course on Engineering Surveying*, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 144 - 154.
- [STEMPFHUBER et al., 2000] **Stempfhuber, W., Ehrl, M. u. Demmel, M.:** *Umsetzung der Teilschlagtechnik und Erfassung der Qualität der teilschlagvariierten Applikationen*, [Hrsg.] P. Schröder, B. Huber und J. C. Munch (GSF), FAM-Jahresbericht 2000, Nr. 48.
- [STEMPFHUBER, 2001a] **Stempfhuber, W.:** *The Integration of Kinematic Measuring Sensors for Precision Farming Calibration*, The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, FIG Proceedings.
- [STEMPFHUBER, 2001b] **Stempfhuber, W.:** *Leistungsmerkmale von zielverfolgenden Tachymetern bei dynamischen Applikationen*, DVW Schriftenreihe 42/2001, Qualitätsmanagement in der Geodätischen Messtechnik, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 189 - 205.
- [STEMPFHUBER et al., 2001] **Stempfhuber, W., Ehrl, M. u. Demmel, M.:** *Umsetzung der Teilschlagtechnik und Erfassung der Qualität der teilschlagvariierten Applikationen*, [Hrsg.] P. Schröder, B. Huber und J. C. Munch (GSF), FAM-Jahresbericht 2001, Nr. 52.
- [STEMPFHUBER, 2002] **Stempfhuber, W.:** *Kalibrierung GPS gestützter Positionsbestimmungen in Precision Farming*, DVW Schriftenreihe 44/2002, GPS 2002: Antennen, Höhenbestimmung und RTK-Anwendungen, Wittwer Verlag Stuttgart, S. 94 - 106.
- [STEMPFHUBER et al., 2002] **Stempfhuber, W., Ehrl, M. u. Demmel, M.:** *Umsetzung der Teilschlagtechnik und Erfassung der Qualität der teilschlagvariierten Applikationen*, [Hrsg.] P. Schröder, B. Huber und J. C. Munch (GSF), FAM-Jahresbericht 2002, Nr. 56.
- [STEMPFHUBER et al., 2004] **Stempfhuber, W., Ehrl, M. u. Demmel, M.:** *Umsetzung der Teilschlagtechnik und Erfassung der Qualität der teilschlagvariierten Applikationen*, [Hrsg.] P. Schröder, B. Huber und J. C. Munch (GSF), FAM-Jahresbericht 2004, in Vorbereitung.
- [STERNBERG, 1998] **Sternberg, H., Caspary, W. u. Heister, H.:** *Determination of the Trajectory surveyed by the Mobile Survey System KISS*, Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, TU Wien, S. 361 - 366.

- [TAKACS, 2001] **Takacs, B.:** *The Accuracy of GPS without SA*, The 3rd International Symposium on Mobile Mapping Technology, FIG Symposium, Kairo.
- [TAWNSEND, 1995] **Tawnsend, B.:** *Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop*, Proceedings of ION 1995 National Technical Meeting, Anaheim, Ca., S. 277 - 283.
- [WANG, 1997] **Wang, J. G.:** *Filtermethoden zur fehlertoleranten kinematischen Positionsbestimmung*, Schriftenreihen der Universität der Bundeswehr München, Heft 52/1997.
- [WANNINGER, 2000] **Wanninger, L.:** *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationen*, DGK-Reihe C, Heft Nr. 508.
- [WANNINGER, 2002] **Wanninger, L.:** *Möglichkeiten und Grenzen der relativen GPS- Antennenkalibrierung*, ZfV 1/2002 Jahrgang 127, S. 51 - 58.
- [WASMEIER, 2002] **Wasmeier, P.:** *Potential der Objekterkennung mit dem Videotheodoliten TCA2003*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Technische Universität München, Lehrstuhl für Geodäsie.
- [WEBER, 2000] **Weber, H.:** *Auswertestrategien für Kreismessungen in der Ingenieurvermessung*, In: Schnädelbach, K. u. Schilcher, M. [Hrsg.]: *Ingenieurmesskurs 2000 XIII. International Course on Engineering Surveying*, Wittwer Verlag, Stuttgart, S. 433 - 438.
- [WELLS, 1986] **Wells, D.:** *Guide to GPS Positioning*, Canadian GPS Associates.
- [WIESER, 2002] **Wieser, A.:** *Robust and Fuzzy Techniques for Parameter Estimation and Quality Assessment in GPS*, Shaker Verlag Aachen.
- [WITTE u. SCHMIDT, 2000] **Witte, B. u. Schmidt, H.:** *Vermessungskunde und Grundlagen der Statistik für das Bauwesen. 4. neubearb. Auflage*, Konrad Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [WUNDERLICH, 1993] **Wunderlich, Th., A.:** *Die gefährlichen Örter der Pseudostreckenortung*, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessung der Universität Hannover, Nr. 190.
- [WUNDERLICH, 2003] **Wunderlich, Th., A.:** *Ingenieurgeodäsie - die Faszination ständiger Herausforderung*, VGI, 2/2003.
- [ZEBHAUSER, 2000] **Zebhauser, B.:** *Zur Entwicklung eines GPS-Programms für Lehre und Tests unter besonderer Berücksichtigung der Ambiguity Function Methode*, DKG-Reihe C, Heft Nr. 523.
- [ZEISKE, 1999] **Zeiske, K.:** *Eine neue Tachymetergeneration von Leica Geosystems*, Leica Veröffentlichung.

Dank

Ein herzlicher Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Alexander Wunderlich, Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München. Er hat durch seine umfangreiche Erfahrung wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Ich möchte mich ganz besonders für das uneingeschränkte Vertrauen während der gesamten Arbeit bedanken.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Maria Hennes, Geodätisches Institut der Universität Karlsruhe, danke ich besonders für die Übernahme des Korreferats und für die zahlreichen Anregungen.

Außerdem möchte ich mich sehr herzlich bei Herrn Emeritus Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach, Geodätisches Institut der Technischen Universität München bedanken. Er hat durch die enge Zusammenarbeit und die konstruktiven Anregungen zu Beginn der Arbeit die Ausgangsbasis geschaffen. Natürlich bin ich dem ehemaligen Leiter des Geodätischen Prüflabors an der Technischen Universität, Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Maurer (†), zu besonderem Dank verpflichtet. Er hat durch sein Engagement die Mitarbeit an den beiden FAM-Teilprojekten ermöglicht.

Darüber hinaus danke ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hermann Auernhammer, Herrn Dr.-Ing. Markus Demmel sowie Herrn M.Sc., Dipl.-Ing. (FH) Markus Ehrl vom Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, der Technischen Universität München für die Zusammenarbeit im FAM-Projekt und für alle Hilfestellungen. Viele Inhalte der Arbeit wären ohne diese Kooperation und den fachlichen Austausch nicht oder nur bedingt möglich gewesen. Bei dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) möchte ich mich zusätzlich für die Finanzierung der beiden Teilprojekte im Verbundprojekt FAM bedanken.

Frau Katharine Geiger (M.A.) danke ich ganz besonders für das Korrekturlesen und für den gesamten Beistand während der Arbeit.

Die vorliegende Arbeit konnte nur im Rahmen eines kreativen und motivierenden Umfeldes entstehen. Daher danke ich allen Mitgliedern des Lehrstuhls für Geodäsie und des Fachgebiets Geoinformationssysteme für die freundschaftliche Atmosphäre und die vielen kleinen Hilfestellungen jeglicher Art.

Curriculum Vitae

allgemeine Angaben:

Name: Werner Vitus Stempfhuber
Geburtsdatum: 22.10.1969
Geburtsort: Mamming

Ausbildung und beruflicher Werdegang

1975 - 1984 Grund- und Hauptschule in Mamming
1984 - 1987 Ausbildung zum Karosserie- und Fahrzeugbauer
bei der Fa. Neoplan in Pilsting
1987 - 1988 u. Facharbeiter als Karosserie- und Fahrzeugbauer
1989 - 1991 bei der Fa. Neoplan
1988 - 1989 Berufsaufbauschule in Dingolfing
1990 Grundwehrdienst
1991 - 1993 Berufsoberschule in Landshut (*Abitur*)
1993 - 1998 Studium des Vermessungswesens an der
Technischen Universität München
1997 - 1998 Auslandsstudium an der „University of Greenwich (England)“
1998 Diplomarbeit bei der Fa. Leica Geosystems in Heerbrugg,
(Schweiz)
Thema: „Kinematische Vermessung mit GPS und
zielverfolgendem Tachymeter“
seit 1999 wissenschaftlicher Assistent am Lehrstuhl für Geodäsie der
Technischen Universität München