

Zentimetergenauigkeit in Echtzeit - Von der Offline-Auswertung zum Automatisierten GPS- Meßsystem

Stefan Leinen, Andreas Mathes und Michael Gianniou
Institut für Physikalische Geodäsie
Technische Hochschule Darmstadt

EINLEITUNG

Die Nutzung des Global Positioning System (GPS) für Anwendungen in der Geodäsie ist seit vielen Jahren Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten am Institut für Physikalische Geodäsie der Technischen Hochschule Darmstadt. Für eine große Anzahl von Aufgaben wurden Konzepte und Softwarelösungen entwickelt. Mit diesen Programmen wird die Auswertung der Meßdaten in der Regel nach den Feldmessungen Offline im Büro durchgeführt. Für die praktische und routinemäßige Anwendung ist hingegen ein höchstmöglicher Grad an Produktivität gefordert. Diese kann im wesentlichen durch die Automatisierung von Meß- und Auswertebläufen erreicht werden. Vielfach wird darüber hinaus die Verfügbarkeit und Präsentation der Ergebnisse vor Ort im Feld und in Echtzeit gewünscht. Deshalb wird derzeit ein auf GPS basierendes Vermessungssystem entwickelt, welches die automatische Bearbeitung wesentlicher geodätischer Aufgabenstellungen ermöglichen wird, beispielsweise die Koordinierung von Vermessungspunkten, topographische Aufnahmen und die Berechnung von Trajektorien bewegter Objekte. Zudem muß das System flexibel an spezielle Projekte oder Aufgaben angepaßt werden können.

Die wichtigsten Merkmale eines solchen Systems sind: Die Registrierung der Daten erfolgt in Echtzeit und deren Auswertung soll Online mit möglichst geringer Verzögerung ablaufen, so daß die Resultate unmittelbar verfügbar sind. Mit dem System sollen sowohl statische als auch kinematische Messungen durchführbar und auswertbar sein, wobei die angestrebte Genauigkeit in Abhängigkeit von der Meßmethode im Bereich von wenigen Millimetern bis einem Zentimeter liegt. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, müssen auf der Hard- und Softwareseite einige Voraussetzungen erfüllt sein. So ist die gewünschte Genauigkeit nur bei differentieller Anwendung von GPS erzielbar. Deshalb muß in das System eine Möglichkeit zum Datentransfer über Funk integriert sein, wodurch die Übertragung von Daten der Referenzstation zu mobilen Stationen und somit eine Online-Auswertung mit entsprechender Genauigkeit möglich wird. Die Software auf beiden Stationen muß in eine Echtzeitumgebung implementiert sein, die eine parallele Bearbeitung verschiedener Aufgaben gestattet. So muß z.B. auf der mobilen Station der Empfang der Daten von der Referenzstation parallel zur Steuerung des mobilen Empfängers sowie zur Auswertung durchgeführt werden. Der Betrieb der Referenzstation wird derart automatisiert, daß keinerlei Eingriff von Seiten des Benutzers erforderlich ist. Die Echtzeitfähigkeit des Systems ist zudem nur dann gewährleistet, solange die Leistungsgrenze der Rechnerhardware noch nicht erreicht ist. Entsprechend leistungsfähige Hardware muß also eingesetzt werden.

Eine zentrale Bedeutung für die Leistungsfähigkeit eines solchen Systems kommt dem Auswertalgorithmus auf der mobilen Station zu. Lange Besetzungszeiten auf Einzelpunkten sollen vermieden werden und eine kinematische Positionierung möglich sein. Deshalb besitzt der hochentwickelte Algorithmus die Fähigkeit zur Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten sowohl für kurzzeitstatische Punktbesetzungen (Rapid-Static) als auch für kinematische Anwendungen (On-The-Fly, OTF). Im folgenden werden zunächst die bereits vorhandenen Komponenten des Systems und der Stand der Systemintegration dargestellt, anschließend künftige Entwicklungsschritte kurz angesprochen.

ENTWICKLUNGSSTAND

Das angestrebte, automatisierte GPS-Meßsystem wird auf der Basis der am Institut vorhandenen Hardware entwickelt. Wichtige Aspekte bei der Auswahl der Komponenten sind die Genauigkeit des GPS-Empfängers, die Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Datenübertragung sowie die Leistungsfähigkeit der Rechner. Zudem darf man weitere Aspekte, z.B. Größe und Gewicht, welche gerade beim Aufbau der mobilen Station eine wichtige Rolle spielen, nicht außer acht lassen. Deshalb ist die derzeit eingesetzte Ausrüstung als Prototyp anzusehen. Für den alltäglichen Feldeinsatz werden in Zukunft sehr kompakte Geräte Verwendung finden.

Zum Empfang der GPS-Signale werden im Augenblick hochgenaue, geodätische Empfänger der Firma Trimble vom Typ 400SSE benutzt. Diese Empfänger sind in der Lage, auch bei Verschlüsselung des P-Codes (Anti-Spoofing), beide Frequenzen mit voller Wellenlänge zu empfangen. Die GPS-Peripherie besteht darüber hinaus aus Empfangsantenne, Batterie bzw. Netzteil und entsprechender Verkabelung. Für Einzelpunktbestimmungen wird die Antenne wahlweise auf einem Pfeiler, Stativ oder Lotstab montiert, bei kinematischen Messungen hingegen direkt auf dem bewegten Objekt. Zur Datenübertragung zwischen Referenzstation und mobiler Station stehen zwei Radiomodem von Philips mit einer maximalen Übertragungsrate von 9,6 kBaud zur Verfügung. Die vergleichsweise hohe Baudrate ermöglicht zum einen die problemlose Übertragung aller Beobachtungsdaten zuzüglich externer Informationen und limitiert zum anderen nicht den weiteren Ausbau des Systems. Die maximale Reichweite des Systems liegt bei ca. 20 km, die tatsächliche Reichweite ist jedoch stark von der Topographie und den atmosphärischen Bedingungen abhängig. Für die mobile Station stehen Notebooks mit Prozessoren vom Typ 486/DX2 zur Verfügung. Auf der Referenzstation können bei vorhandenem Stromanschluß stationäre PCs eingesetzt werden. Der Datentransfer über die Funkmodem erfolgt seriell mittels Interruptsteuerung. Beim mobilen Feldeinsatz können alle Geräte mit Ausnahme der Bedieneinheit (Notebook) in einem Rucksack untergebracht werden.

Bei der Konzeption einer Software, die den in der Einleitung angesprochenen Anforderungen genügt, spielt der bereits erwähnte Begriff der Echtzeit eine wesentliche Rolle. Eine der zentralen Forderungen an ein Echtzeitsystem ist die Fähigkeit mehrere Aufgaben (engl. Tasks) gleichzeitig durchzuführen. Dieses sogenannte Multitasking darf nur minimale Taskwechselzeiten aufweisen und sollte in der Lage sein, verschiedene Tasks miteinander zu synchronisieren. Bei all diesen

Anforderungen muß allerdings stets eine gewisse Reserve in bezug auf Rechenleistung vorhanden sein, damit keine Tasks durch Vollausslastung des Systems blockiert werden. In unserer Software verwenden wir einen DOS-Kernel, welcher in der Lage ist, auf einem Intel-kompatiblen Prozessor eine Echtzeit-Multitasking-Umgebung zu erzeugen. Dieser RT-Kernel (Real Time-Kernel) bildet die Basis der gesamten Software auf der Referenz- und der Mobilstation. Die Programmierung erfolgt aus Gründen der Hardwarenähe und Rechengeschwindigkeit in C/C++.

Für die Entwicklung des GPS-Meßsystems konnte teilweise auf bereits vorhandene Programme zurückgegriffen werden. So wurde Software zur Steuerung der Empfänger und Registrierung der Beobachtungsdaten (Data-logging) sowie die Datenübertragung mittels Radiomodem (Data-transceiving) erstellt und auf den RT-Kernel als eigenständige Tasks angepaßt. Diese Tasks kommunizieren mit den angeschlossenen Geräten über serielle Schnittstellen auf der Basis einer Interruptsteuerung. Um die Datenmenge und damit den Zeitaufwand beim Datentransfer gering zu halten und mögliche Übertragungsfehler zu minimieren, werden die Daten in einem kompakten Binärformat übermittelt. Zusätzlich werden auf beiden Stationen zur Datensicherung die dort registrierten Beobachtungen im RINEX-Format (Receiver INdependent EXchange) abgespeichert.

Ein Schwerpunkt der Forschungsarbeit am Institut liegt in der Entwicklung von effizienten Auswertelgorithmen für GPS-Beobachtungen. Für den Nahbereich mit Entfernungen von maximal 15 Kilometern zwischen zwei Empfängern sind Programme entwickelt worden, die es ermöglichen, kurzzeitstatische und kinematische Beobachtungen mit hoher Genauigkeit auszuwerten. Diese lösen die Phasenmehrdeutigkeiten (Ambiguitäten) zuverlässig in kürzester Zeit. Geschwindigkeit bedeutet in diesem Zusammenhang zweierlei: Zum einen wurden die Algorithmen bezüglich minimaler Rechenzeit optimiert, zum anderen hinsichtlich minimal notwendiger Beobachtungszeit auf den Einzelpunkten (Rapid-Static-Algorithmus) bzw. schnellstmöglicher Lösung der Ambiguitäten in der Bewegung (OTF-Algorithmus). Unter der Auflösung der Phasenmehrdeutigkeiten ist die Bestimmung der ganzzahligen Werte der Ambiguitäten aus der Ausgleichung der Beobachtungen zu verstehen. Nur wenn die korrekten Ambiguitäten als bekannte Größen in die anschließende Ausgleichung eingehen, ist eine Genauigkeit im Millimeter- bis Zentimeterbereich erreichbar. Der im folgenden kurz beschriebene Algorithmus ist in der Lage, sowohl für statische als auch kinematische Beobachtungen die Mehrdeutigkeiten aufzulösen. Aus den Messungen auf der Referenz- und Mobilstation werden als Beobachtungsgrößen für die Ausgleichung Doppeldifferenzen, sowohl für die Trägerphasen als auch die Codebeobachtungen, gebildet. Zunächst wird mit den Code-Doppeldifferenzen eine Näherungsposition berechnet, die dazu dient, Anfangswerte für die Ambiguitäten zu bestimmen. Die Genauigkeit dieser reellwertigen Ambiguitäten ist folglich unmittelbar von der Codelösung abhängig. Zu den wichtigsten Faktoren, die sie beeinflussen, gehören u.a. die Empfängerqualität, die Anzahl und die Geometrie der beobachteten Satelliten, die Basislinienlänge und natürlich das Auswertemodell. Mit Hinblick auf alle diese Faktoren wird für jede Ambiguität ein Suchintervall berechnet, in dem der richtige Wert liegen soll. Alle in diesen Intervallen liegenden ganzen Zahlen sind Kandidaten für die gesuchten Ambiguitäten. Da die Zahl der möglichen Kombinationen zwischen allen Ambiguitäten sehr groß ist, ist es äußerst wichtig, die meisten davon von

vorneherein auszuschließen. Dafür wird als Kriterium die Beziehung zwischen den zwei Trägerfrequenzen (L1 und L2) des GPS-Signals benutzt. So wird eine L1-Ambiguität nur dann akzeptiert, wenn die Skalierung in L2-Einheiten ebenfalls einen ganzzahligen Wert ergibt. Mit dieser Methode und unter Berücksichtigung aller oben genannten Faktoren ist es möglich, die Anzahl von Kombinationen um bis zu weit über 90 % zu reduzieren. Mit den verbleibenden Kandidaten werden für alle Kombinationen neue Ausgleichungen mit den Mehrdeutigkeiten als feste, bekannte Größen gerechnet. Die daraus resultierenden Lösungen werden anhand der Residuenquadratsumme miteinander verglichen. Die Ambiguitätenkombination, die zur Lösung mit der kleinsten Residuenquadratsumme führt, wird als plausibelste Lösung anerkannt und anhand des mittleren Positionsfehlers überprüft.

Für kurzzeitstatische Anwendungen können Beobachtungen von mehreren Epochen in diesen Suchalgorithmus einfließen und zu einer Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit führen. Im kinematischen Fall aber entspricht jeder Zeitpunkt (Epoche) einer anderen Position, so daß für jede Epoche der Suchalgorithmus neu gestartet werden muß, bis die korrekten Ambiguitäten gefunden sind. Diese werden dann beibehalten, solange kein Signalverlust auftritt. Darüber hinaus kommen sogenannte Integritätskriterien zum Einsatz, die während der Bewegung die aktuellen Ambiguitäten auf ihre Zuverlässigkeit testen. In die Software der mobilen Station des hier beschriebenen GPS-Meßsystems sind sowohl der Rapid-Static- als auch der OTF-Algorithmus integriert.

WEITERE ENTWICKLUNG

Gegenwärtig liegt der Schwerpunkt der Arbeiten in der Integration der im vorherigen Kapitel beschriebenen Komponenten zu einem funktionsfähigen, automatisierten System. Anhand zahlreicher Projekte und Auswertungen haben die Programme ihre Leistungsfähigkeit im Offline-Modus demonstriert. Die weiteren Entwicklungsstufen des dann existierenden Systems sollen hier aufgezeigt werden. Im wesentlichen sehen wir in vier Bereichen Möglichkeiten zur Weiterentwicklung: in der Integration neuer Hardwarekomponenten, in der Erweiterung und Verbesserung der Algorithmen zum Betrieb der Referenzstation, zur Datenübertragung sowie zur Auswertung der Daten auf der mobilen Station.

Integration neuer Hardwarekomponenten

Obwohl die künftige Entwicklung der Hardware noch nicht genau absehbar ist, lassen sich doch einige Trends erkennen. Der für die Entwicklung unseres Systems wichtigste Trend liegt in der weiteren Miniaturisierung der Hardware. Deren Verwendung mit unserer Software stellt allerdings bei genau definierten Schnittstellen kein großes Problem dar.

Zunächst wird sich die Entwicklung zu kleineren und leistungsfähigeren Geräten mit geringem Stromverbrauch fortsetzen, woraus sich für unser System im routinemäßigen Feldeinsatz Vorteile durch geringeres Gewicht und geringere Größe ergeben. Dies wird insbesondere die Funkmodem, die herkömmlichen GPS-Empfänger einschließlich deren Stromversorgung und die Steuerungseinheit betreffen.

Ein weiterer Trend in der Entwicklung von GPS-Empfängern geht weg von eigenständigen Geräten hin zu PC-Komponenten. So existieren bereits leistungsfähige Empfänger als PC-Einsteckkarten, die als Einfrequenzempfänger Code- und Phasenmessungen liefern. Zudem sind für Anfang 1995 bereits entsprechende Zweifrequenzempfänger angekündigt. Noch wesentlich kompakter sind die als PCMCIA-Karten für Notebooks konstruierten Empfänger, die es bisher aber nur als reine Einfrequenz-Code-Empfänger gibt. Hier bleibt die weitere Entwicklung abzuwarten. Bisher noch etwas störend ist die Steuerung der Mobilstation mit einem Notebook, insbesondere mit Blick auf den alltäglichen Einsatz, z.B. wenn Punkte nur zu Fuß erreichbar sind. Deshalb ist die Anschaffung eines Handgerätes geplant, das auf DOS-Basis arbeitet und mit der notwendigen Leistung und den benötigten Schnittstellen ausgestattet ist.

Die bisher genannten Trends kommen im wesentlichen der mobilen Seite des Systems zugute. Aber auch für die Referenzstation lassen sich diese Entwicklungen sinnvoll einsetzen. Dies vor allem mit Blick auf den Aufbau einer "portablen Referenzstation", die flexibel eingesetzt werden kann.

Ausbau der Referenzstation

In der bisherigen Konzeption des Meßsystems dient die Referenzstation nur zur Registrierung und Übermittlung der Beobachtungsdaten an die mobile Station. Im weiteren Ausbau werden zu dieser Aufgabe jedoch zusätzliche Komponenten hinzugefügt, die den Charakter der Referenzstation als reines Instrument zur Datenerfassung erweitern. Hierzu seien die im folgenden näher erläuterten Stichworte Datenverwaltung, Modellierung von Atmosphäreparametern, Integrity Monitoring, Remote Control und Zentralrechner genannt.

Mit Hinblick auf die beabsichtigte Erweiterung des Anwendungsbereichs eines solchen Systems wird die Modellierung der lokalen Atmosphärebedingungen wichtig. Dazu soll an die Referenzstation eine Wetterstation angeschlossen werden, die während des Betriebs Temperaturen (trocken und feucht) und Luftdruck mißt. Diese werden zur Aktualisierung der Parameter des im Auswertalgorithmus implementierten Troposphärenmodells verwendet. Zudem kommt der Referenzstation die Aufgabe zu, anhand der Beobachtungen sowie der bekannten Position aktuelle Ionosphärenparameter zu bestimmen. Die Modellparameter werden dann an die mobile Station übermittelt.

Einen für die Zuverlässigkeit des Meßsystems wichtigen Aspekt stellt die ständige Überprüfung der Integrität des GPS-Systems dar (Integrity Monitoring). Darunter versteht man die permanente Analyse der Signale der Satelliten mit Hinblick auf Störungen, Systemmeldungen oder andere Ereignisse, welche die Genauigkeit mindern können. Beispielsweise wird die aus Codebeobachtungen berechnete Position auf der Referenzstation anhand der bekannten Sollposition auf fehlerhafte Satellitensignale hin analysiert. Solche Informationen über den Status des System werden dann der mobilen Station zur Verfügung gestellt.

Für größere Projekte wird als zusätzliche Komponente ein Datenbanksystem unabdingbar, in dem alle relevanten Informationen (Stationsparameter,

Beobachtungsdaten, Koordinatenverzeichnis usw.) abgelegt werden können. Zudem sollen die anfallenden Daten über Telekommunikationsnetze, z.B. ISDN oder Internet, abgefragt werden können. In die Software auf der Referenzstation ist folglich ein geeignetes Datenbanksystem sowie ein Interface zu deren Abfrage, einschließlich entsprechender Hardware, zu integrieren. Mit letztgenannten Komponenten rückt auch die Möglichkeit einer Fernbedienung (Remote Control) der Referenzstation in den Blickpunkt. Der Betrieb könnte von einem stationären Zentralrechner aus gesteuert, Betriebsparameter geändert, Ergebnisse und sonstige Daten abgerufen werden. Wird der Datenfluß zwischen Referenzstation und mobiler Station dahingehend modifiziert, daß nicht nur Daten zur mobilen Station gesendet werden, sondern auch Resultate von der mobilen Station zur Referenzstation (bidirektionaler Datenfluß) und von dort weiter zum Zentralrechner, so könnte ein Projekt in Echtzeit zentral gesteuert und die Ergebnisse bereitgestellt werden.

Weiterentwicklung der Datenübertragung

Die Datenübertragung muß, eng verbunden mit einer Überarbeitung des Referenzstationkonzepts, vor allem eine hohe Zuverlässigkeit der übertragenen Daten garantieren. Ein einfacher Test mit Prüfsummen reicht hier bei weitem nicht mehr aus. Vielmehr müssen Konzepte, wie z.B. Kanalcodierung oder Interleaving, Einzug halten, um nicht durch unentdeckte Übertragungsfehler die Genauigkeit der Positionsbestimmung nachteilig zu beeinflussen. Darüber hinaus ist es in Zukunft notwendig, einen bidirektionalen Datenfluß zu gewährleisten. Die sich hieraus ergebenden Anforderungen an die Hard- und Software sind nicht unerheblich und erfordern eine teilweise Umstrukturierung der bisher vorhandenen Algorithmen. Im besonderen bedeutet dies die Vermeidung eines gleichzeitigen Sende- und Empfangsvorgangs an einem Modem und die Bereitstellung eines zweigeteilten Pufferspeichers für Senden und Empfangen.

Erweiterung der Auswertalgorithmen

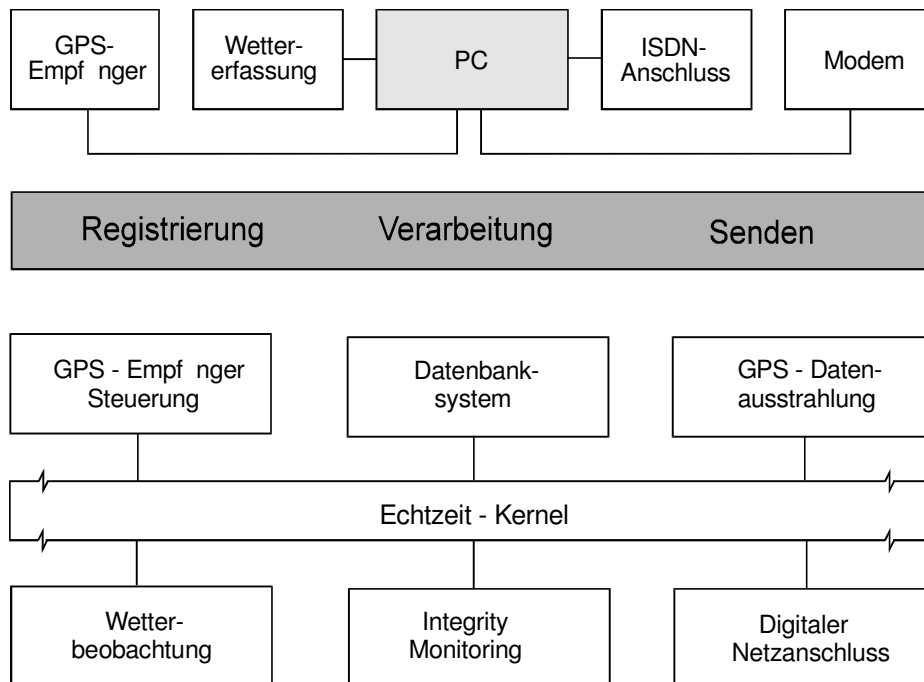
Im Fall der Positionsbestimmung und der damit eng verbundenen Mehrdeutigkeitsauflösung liegen die Schwerpunkte auf der Erhöhung der Zuverlässigkeit und Geschwindigkeit der Algorithmen und einer weitgehenden Automatisierung der Berechnung. Die letzte Forderung steht dabei eng im Zusammenhang mit einer Menüführung unter einer benutzerfreundlichen Oberfläche. Was den Aspekt der Geschwindigkeitssteigerung der Auswertalgorithmen anbelangt, bedeutet dies in erster Linie, mit weniger Beobachtungen bzw. einem kürzeren Beobachtungszeitraum als bisher zu einer korrekten Lösung zu kommen (Zentimeter-Genauigkeit in Echtzeit!). Der heutige Stand der Algorithmen erlaubt eine Auswertung von kurzen Basislinien unter 15 Kilometern. In Zukunft wird es Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, ob eine Modifizierung zu einem Einsatz über größere Entfernungen führen kann. Hauptrolle hierbei spielen atmosphärische Einflüsse wie die troposphärische und insbesondere die ionosphärische Refraktion.

Darüber hinaus muß die Beziehung zwischen Meßdauer und erreichbarer Genauigkeit untersucht werden, um Genauigkeiten im Bereich einiger Millimeter zu erzielen, selbst mit sehr kurzen Beobachtungszeiten von wenigen Sekunden. Hierbei gilt es, die systematischen und periodischen Einflüsse auf eine Positionierung mittels

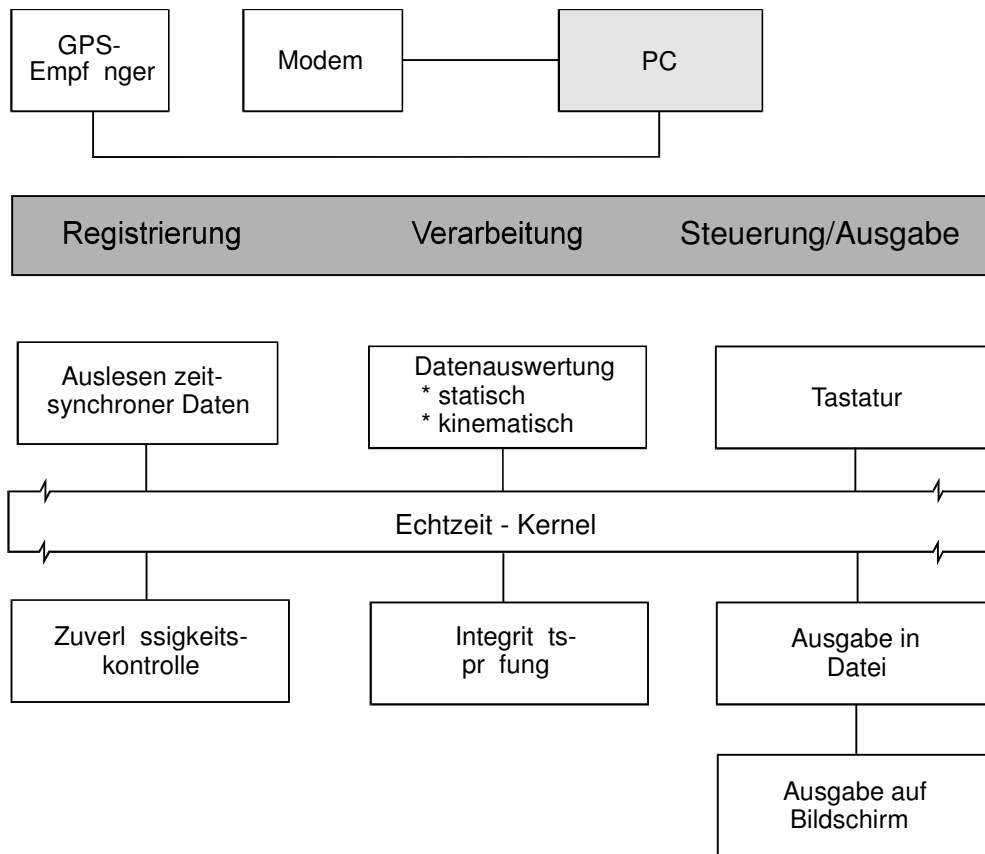
GPS zu erfassen und zu eliminieren. Mit zunehmender Genauigkeitsanforderung auf dem Gebiet der Navigation mit GPS-Satelliten erhöht sich zudem mehr und mehr die Notwendigkeit einer durchgreifenden Kontrolle der Ergebnisse wie auch der Beobachtungen. Solche Integritätsprüfungen oder -tests gewinnen damit ebenfalls eine große Bedeutung auf dem Gebiet der Satellitengeodäsie. Auch der Gesichtspunkt, die Ergebnisse graphisch darzustellen, z.B. mit Hilfe von Digitalen Karten, wird in Zukunft behandelt werden.

AUSBLICK

Alle in diesem Artikel erwähnten Komponenten werden in eine gemeinsame Echtzeitumgebung mit Multitasking-Fähigkeit auf einer kooperativen Basis eingebunden (Fig. 1 und 2). Dies wird in der Lage sein, eine Positionsbestimmung innerhalb kürzester Zeit durchzuführen, sowohl im stationären wie in bewegten Fall und mit Genauigkeiten im Bereich besser als ein Zentimeter. Die Entfernung zwischen Referenz- und Mobilstation soll dabei deutlich über zehn bis fünfzehn Kilometer liegen.



Figur 1 Konzept der Referenzstation



Figur 2 Konzept der Mobilstation