# Zur großräumigen Vernetzung von GNSS Referenzstationen

von
Gerhard Wübbena
Geo++® Gesellschaft für satellitengestützte
geodätische und navigatorische Technologien mbH
Garbsen
www.geopp.de

### **Einleitung**

Die Vernetzung von GNSS Referenzstationen zur Steigerung der Qualität von RTK Messungen innerhalb des Netzbereiches ist nunmehr seit wenigen Jahren zur bevorzugten Technik geworden. Mit zunehmendem Ausbau insbesondere der Kommunikationsinfrastrukturen sowie zunehmender Rechnerkapazität stehen vermehrt Netze mit höherer Anzahl von Stationen sowie größerer Flächenüberdeckung zur Verfügung. Großräumige Netze zeichnen sich somit sowohl durch einen größeren Versorgungsbereich als auch durch erhöhte Redundanz durch die wachsende Anzahl von Referenzstationen aus.

Beide Eigenschaften lassen sich durch eine simultane Auswertung in einem Guss, d.h. durch einen vollständigen Multistations- und Multisignalauswerteprozess im Hinblick auf verschiedene Aspekte vorteilhaft nutzen. Durch die Zusammenführung der Daten eines großräumigen Netzes mit erhöhter Anzahl von Referenzstationen lassen sich im Vergleich zu kleinräumigen Netzen und wenigen Stationen verschiedene Vorteile erreichen, die sich einerseits aus der erhöhten Redundanz und andererseits aus der besseren Trennbarkeit der Zustandsparameter aufgrund der größeren Netzausdehnung ergeben.

Der Schlüssel zu einer besseren Qualität der Netzdienste wie auch zur Optimierung der Kommunikation und Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Netzen und zwischen Netz und Nutzer liegt dabei in der vollständigen Zustandsmodellierung.

#### Aufgabe von Referenzstationsnetzen

Der ursprüngliche Ansatz der Referenzstationsvernetzung hatte primär das Ziel, verbesserte Korrekturdaten für einen RTK-Rover zur Verfügung zu stellen, um eine homogene Qualität der RTK Lösungen im Hinblick auf Genauigkeit, Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit zu erreichen.

Hierzu werden prinzipiell nach erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung innerhalb des Netzes die Korrekturdaten (RTCM 20/21) für die Roverposition aus den mehrdeutigkeitsbereinigten Korrekturwerten der Referenzstationen interpoliert. Entfernungsabhängige Fehleranteile werden dadurch bis auf kleine Restfehler eliminiert. Dieses Grundprinzip benötigt für eine eindeutige flächenhafte Interpolation genau 3 Referenzstationen. Jedoch liegen bei Verwendung von 3 Stationen keine Überbestimmungen vor, so dass hierin keine bevorzugte Lösung gesehen werden kann.

Die primäre Aufgabe eines Referenzstationsnetzes für den RTK-Betrieb besteht darin, die Mehrdeutigkeiten der Trägerphasenmessungen innerhalb des Netzes zu lösen. Alle Phasenmessungen, die für die Interpolation der Korrekturen für die Rover verwendet werden, müssen sich auf das gleiche Mehrdeutigkeitsniveau beziehen. Wird eine lineare Interpolation verwendet, so reicht prinzipiell die Erzeugung eines einheitlichen Mehrdeutigkeitsniveaus innerhalb des Dreiecks (Netzmasche) in der sich der Rover befindet. Sollen hingegen weitergehende Interpolationsmodelle verwendet werden oder unidirektionale Datenübertragungsmedien zum Einsatz kommen, so reichen die Dreieckslösungen nicht mehr aus. Man ist dann auf Multistationslösungen angewiesen, die in der Lage sind, das gesamte Netz bzw. größere Teilnetze auf ein einheitliches Mehrdeutigkeitsniveau zu bringen.

Um dieses Ziel zu erreichen müssen in einem Multistationsansatz Modelle verwendet werden, die in der Lage sind, eine erwartungstreue Schätzung des Zustandsvektors, insbesondere bezogen auf die Mehrdeutigkeitsparameter, in Echtzeit zu erlauben. Nur so kann eine korrekte Mehrdeutigkeitslösung sichergestellt werden. Die optimale Lösung für dieses Problem besteht in einer vollständigen Zustandsmodellierung mit Trägerphasengenauigkeit (1 Millimeter). Für den RTK Einsatz ist es erforderlich das Modell für die beiden Trägersignale simultan zu erstellen. Die Reduktion der Modellbildung auf das nicht-dispersive Signal (L0), wie es in den globalen Netzen (z.B. IGS) in der Regel verwendet wird, ist hier nicht ausreichend.

Für RTK Anwendungen besteht ein besonderes Problem darin, dass eine Mehrdeutig-keitslösung für aufgehende Satelliten möglichst schnell herbeigeführt werden muss, da der Satellit erst dann für die Rover zur Verfügung steht. D.h. dass die Modellbildung insbesondere auch für geringe Elevationen ausgelegt sein muss. Dieses stellt eine besondere Herausforderung dar, da der Einfluss der Atmosphäre bei geringen Elevationen nicht nur größer als bei höheren Elevationen, sondern auch schwieriger zu modellieren ist.

#### Vorteile durch hohe Redundanz und große Netzausdehnung

Hohe Redundanz durch erhöhte Anzahl von Referenzstationen und große Netzausdehnung liefern unter Einsatz eines vollständigen Zustandsmodells u.a. folgende Vorteile:

- Möglichkeit der Vergrößerung der Interstationsdistanzen zwischen den Referenzstationen ("Sparse RTK Networks").
- Steigerung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit der abgeleiteten Parameter.
- Möglichkeit der Schätzung und Elimination von stationsabhängigen Fehlereinflüssen.
- Bessere Trennbarkeit von Zustandsparametern.
- Möglichkeit der Verwendung von Zustandsinformationen an Stelle von beobachtungsbezogenen Korrekturdaten.
- Reduktion der erforderlichen Bandbreite der Übertragungsmedien.
- Möglichkeit der Verwendung hierarchischer Netze und Netze mit gegenseitiger Stützung zur weiteren Steigerung der Leistungsfähigkeit.
- Erschließung der Genauigkeitsklasse weniger Dezimeter (GIS) über großräumig verfügbare Medien mit geringer Bandbreite und Kosten.
- Erschließung neuer Anwendungen durch direkte Verwendung von Zustandsinformationen, wie z.B. die Wettervorhersage.

In den folgenden Kapiteln wird auf einige der genannten Punkte näher eingegangen. Eine vollständige und umfassende Behandlung aller relevanten Aspekte ist im Rahmen dieses Beitrags jedoch nicht möglich. Hier wird auf die weitergehende Literatur verwiesen.

# Reduktion der Stationsdichte: "Sparse RTK Networks"

Die Wirtschaftlichkeit eines Referenzstationsnetzes hängt wesentlich von der Dichte der Stationen ab. Je weniger Stationen erforderlich sind, desto geringer sind Investitions—und Betriebskosten. Die wesentlichen Kriterien zur Festlegung der Interstationsdistanzen zwischen den Referenzstationen für den RTK Betrieb sind

- die Mehrdeutigkeitslösung im Netz und
- die wirksamen Restfehler der Interpolation für die Rover.

Die Mehrdeutigkeitslösung im Netz ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Wie bereits erwähnt, müssen die Mehrdeutigkeiten für aufgehende Satelliten möglichst schnell gelöst werden. Die atmosphärischen Fehleranteile wirken bei niedrigen Elevationen jedoch am stärksten. Eine Mehrdeutigkeitslösung wird schwieriger und dauert länger, wenn die Distanz zwischen den Referenzstationen vergrößert wird. Das hat zur Folge, dass die Satelliten erst später für die RTK Nutzer verfügbar sind.

Für den Rover müssen die Fehleranteile aus den Daten der Referenzstationen interpoliert bzw. prädiziert werden. Eine solche Interpolation oder Prädiktion ist mit Restfehlern behaftet, die insbesondere die atmosphärischen Anteile betreffen. Je größer die Interstationsdistanzen sind, desto größer sind auch die zu erwartenden Restfehler. Die "Performance" der Rover lässt somit nach.

Dies gilt insbesondere für den Fall, dass die Rover nicht in der Lage sind die Restfehler geeignet zu modellieren. Das kann entweder dadurch entstehen, dass die im Rover implementierten Auswertealgorithmen nicht auf einen vernetzten Betreib eingestellt sind oder dadurch, dass die Information über die Vernetzung nicht im Datensignal übermittelt wird. So wird z.B. bei der sog. "Virtuellen Referenzstation" dem Rover ein Datensignal übermittelt, dass von einer (virtuellen) Station in unmittelbarer Nähe des Rovers stammt. Hier fehlt jegliche Information über die Vernetzung, so dass eine optimale "Performance" des Rovers nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grunde wird in vielen Netzen der sog. FKP (Flächenkorrekturparameter) Modus verwendet, bei dem der Rover die Position der ursprünglichen Referenzstation erhält. Aus der daraus abzuleitenden Distanz kann eine geeignete Restfehlermodellierung aktiviert werden.

Der begrenzende Faktor für die Distanz zwischen den Referenzstationen lag bisher in der Mehrdeutigkeitslösung im Netz begründet. Die stark gestiegene Redundanz in großräumigen Netzen wird hier jedoch zu einer Verlagerung in Richtung der wirksamen Restfehler führen.

Im Folgenden soll am Beispiel des niedersächsischen SAPOS Netzes die Möglichkeit der Ausdünnung der Netze aufgezeigt werden.

Die Abbildung 1 zeigt das LGN-Netz in bereits ausgedünnter Form. Die Stationsabstände liegen hier bei 66 bis 107 Kilometer. Die Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse für einen Rover in diesem Netz mit einem Abstand von etwa 55 km von der nächstgelegenen

Referenzstation. Man erkennt, dass die Genauigkeit für die horizontalen Koordinaten-komponenten im Bereich von ca. +/- 1 cm liegen, für die Höhe bei etwa 2 cm. Insbesondere der troposphärische Restfehler führt zu einer leichten Verschlechterung der Höhengenauigkeit. Die Initialisierungszeiten (TTFA: Time To Fix Ambiguities) liegen im Mittel bei 43 Sekunden. Dieser Wert ist geringfügig schlechter als bei Netzen mit höherer Stationsdichte.

Eine weitere Ausdünnung des Netzes auf Stationsabstände von 96 bis 220 km führt für einen Rover mit einer Distanz von etwa 65 km zur nächstgelegenen Referenzstation zu ähnlichen Ergebnissen (Abbildungen 3 und 4). Eine Verschlechterung ist bei den Initialisierungszeiten, die im Mittel bei 75 Sekunden liegen, zu beobachten.

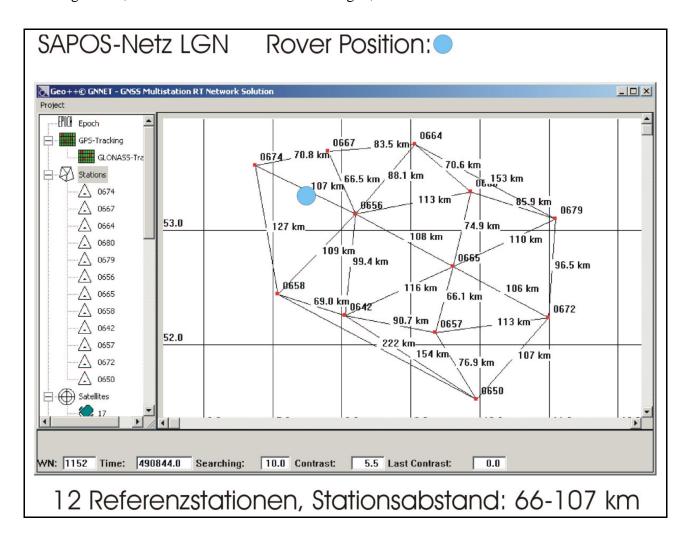


Abbildung 1: Ausgedünntes SAPOS Netz des LGN

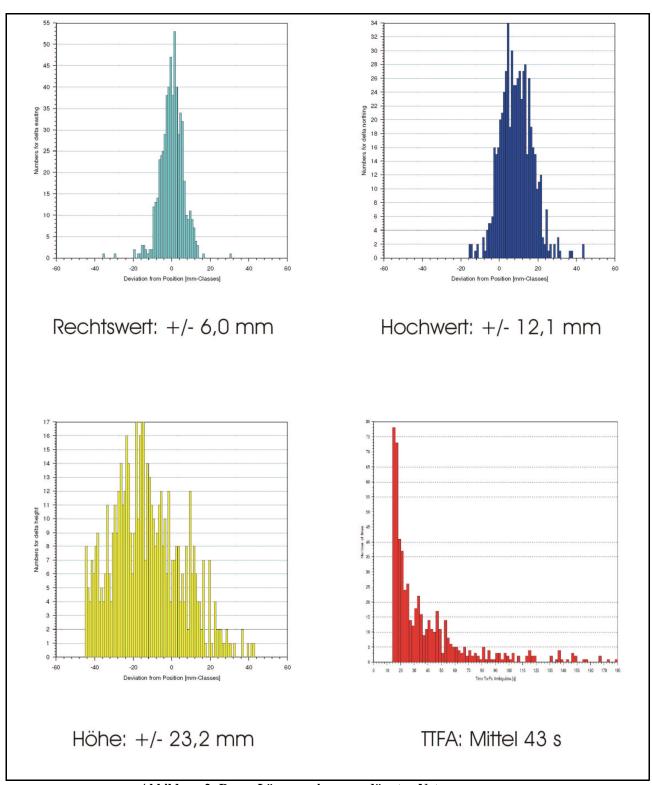


Abbildung 2: Rover Lösungen im ausgedünnten Netz

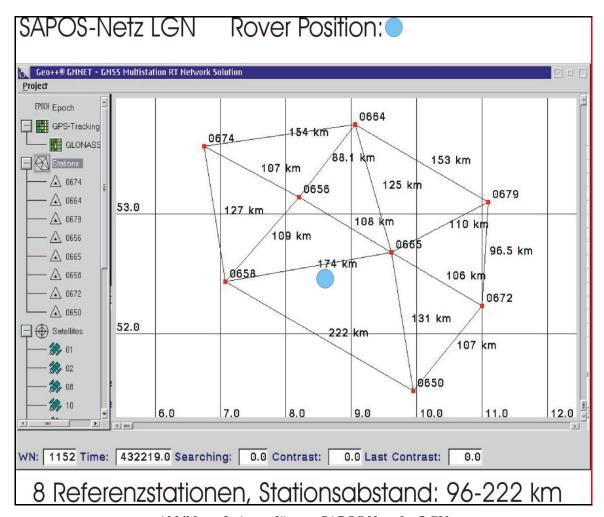


Abbildung 3: Ausgedünntes SAPOS Netz des LGN

Die Beispiele zeigen, dass der Betrieb von ausgedünnten Netzen ("Sparse RTK Networks") möglich ist. Für bestehende Netze mit geringerer Interstationsdistanz bedeutet das, dass durch die hohe Redundanz in diesen Netzen eine sehr gute "Performance" erreicht werden kann und eine sehr hohe Ausfallsicherheit besteht. Der Ausfall einzelner Referenzstation kann hier praktisch ohne Verlust der Leistungsfähigkeit verkraftet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Redundanz besteht darin, dass Referenzstationen aus dem Netzverbund herausgelöst und als unabhängige Monitorstation verwendet werden können. Dadurch lässt sich eine permanente Qualitätssicherung ohne zusätzliche Monitorstationen erreichen.

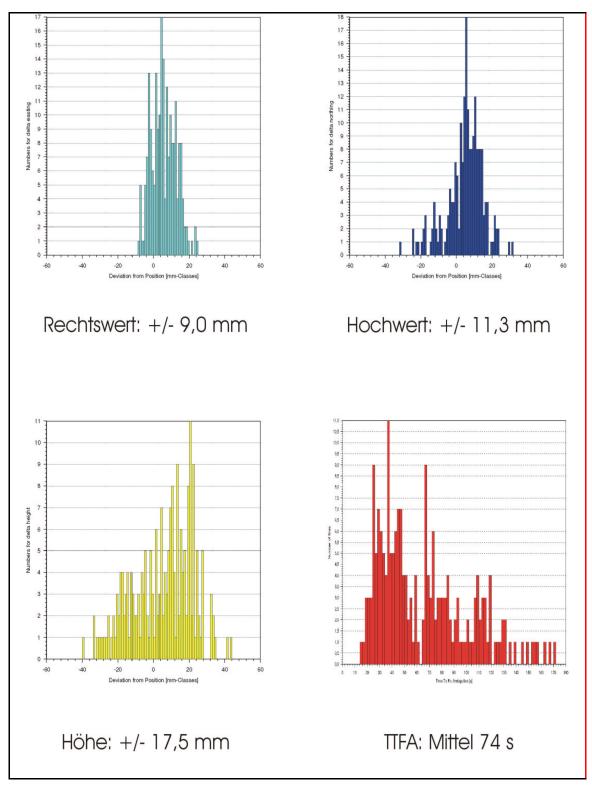


Abbildung 4: Rover Lösungen im ausgedünnten Netz

#### Reduktion stationsabhängiger Fehlereinflüsse

Zu den stationsabhängigen Fehlereinflüssen gehören im wesentlichen die Mehrwegeausbreitungen (Multipath: MP) und die Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV). Für die PCV existieren anerkannte Verfahren der Kalibrierung, so dass der Fehleranteil praktisch vollständig eliminiert werden kann. Für MP sind ebenfalls Kalibrierungsverfahren in der Entwicklung, jedoch ist ein operationeller Einsatz noch nicht absehbar. Weiterhin ist der Aufwand der MP Kalibrierung verhältnismäßig hoch.

Die gesteigerte Redundanz innerhalb von Netzen mit hoher Stationsanzahl erlaubt jedoch eine Reduktion der MP Fehler durch Modellierung und Ausgleichung. Da MP zwischen den beteiligten Referenzstationen als praktisch vollständig unkorreliert betrachtet werden kann, geht der Fehleranteil ab 4 Referenzstationen proportional zur Stationsanzahl zurück.

Eine weitere Variante besteht in der Kalibrierung des MP auf ausgewählten Referenzstationen. Durch den dynamischen Filterprozess lassen sich dann die MP Effekte auf den restlichen Stationen schätzen und praktisch eliminieren. Entsprechende Entwicklungen laufen zurzeit und werden in Kürze für den operationellen Einsatz zur Verfügung stehen.

Dadurch wird erreicht werden, dass die Rover-Lösungen nicht mehr von den teilweise starken Störungen einzelner Referenzstationen betroffen sind. Das führt zu einer weiteren Homogenisierung der Qualität der Dienste.

### Reduktion der Bandbreite der Datenübertragungsmedien

Die erforderliche Bandbreite zur Übertragung der Referenzinformationen einzelner oder vernetzter Referenzstationen spielt eine bedeutende Rolle bei der Auswahl geeigneter Medien als auch bei der Betrachtung der Kosten für den Nutzer eines Referenzdienstes. Im Gegensatz zu der oft verwendeten Übertragung der Daten über GSM, mit der zeitabhängigen Gebührenstruktur, sind die Kosten für neuere Medien im Bereich des mobilen Internets, wie GPRS und UMTS, volumenabhängig. Das bedeutet, dass die Komprimierung der Daten hier eine wichtige Rolle spielt. Das gilt ebenfalls für Medien im Hörfunk-Radiobereich, bei denen nur begrenzte Bandbreiten zur Verfügung stehen.

Bei den herkömmlichen Verfahren des DGNSS und RTK werden Rohdaten oder Korrekturdaten einzelner Referenzstationen übertragen. Man arbeitet hier im sog. Beobachtungsraum (Observation Space). Alternativ dazu besteht die Möglichkeit der Übertragung von Zustandsinformationen. Man arbeitet dann im Zustandsraum (State Space).

Für den GNSS Betrieb sind die wichtigsten Zustandsinformationen die Fehler von Satellitenuhr und –bahn, der Elektronengehalt der Ionosphäre mit dem sich daraus ergebenden Einfluss auf eine GNSS Messgröße sowie die Abweichung der Troposphäre von einer Modelltroposphäre.

Korrekturen einer Referenzstation im Beobachtungsraum fassen den Einfluss aller auf eine entsprechende Beobachtung dieser Referenzstation wirkenden Fehlereinflüsse zusammen. Die notwendige Taktrate zur Übertragung dieser Korrekturen an die Rover ergibt sich als die Taktrate des Fehleranteils mit der höchsten zeitlichen Variation. Das ist in der Regel der Satellitenuhrfehler. Die Bandbreite ergibt sich dann aus der Taktrate und der Bitmenge pro Epoche für die Gesamtkorrektur. Bei Zweifrequenzmessungen werden

die Daten unabhängig für beide Frequenzen übertragen. Das bedeutet, dass die Bandbreite verdoppelt wird.

Sollen die Informationen für ein ganzes Netz von Referenzstationen übertragen werden, so steigt, für den Fall, dass Korrekturdaten verwendet werden, die notwendige Bandbreite linear mit der Anzahl der Stationen. Diese Daten besitzen dann jedoch eine sehr hohe Redundanz, da die gemeinsamen Fehleranteile in den Korrekturen aller Stationen gleichermaßen enthalten sind.

Eine Optimierung der Bandbreite lässt sich erreichen, wenn Parameter des Zustandsraums übermittelt werden. Satellitenabhängige Parameter, d.h. Satellitenuhr- und
-bahnfehler, müssen pro Satellit nur einmal übermittelt werden, sie sind stationsunabhängig. Auch sind diese Parameter frequenzunabhängig. Für die Differenzen zwischen
den verschiedenen Frequenzen und Signalen der Satelliten sind zusätzlich die geringdynamischen Laufzeitunterschiede ("Group Delays") zu betrachten. Der Troposphärenfehler
lässt sich pro Referenzstation z.B. mit 1 oder 2 Parametern beschreiben. Hieraus lässt sich
dann der Fehlereinfluss für alle Satelliten ermitteln. Die Troposphäre ist satellitenunabhängig. Die Ionosphäre ist grundsätzlich stations- und satellitenunabhängig, jedoch ist
die Ionosphäre sehr komplex, so dass eine Modellierung und Beschreibung u.U. eine
Abhängigkeit vorsehen muss.

Die Übertragung von Parametern im Zustandsraum kommt mit einer deutlich geringeren Bandbreite aus, als eine Übertragung im Beobachtungsraum. Während im Beobachtungsraum eine Bandbreite von etwa 2400 Bits pro Sekunde erforderlich ist, zeigen Analysen, dass im Zustandsraum prinzipiell eine Datenrate von 200 Bits pro Sekunde ausreichend ist. Hierdurch wird es möglich auch für Dienste mit höherer Genauigkeit die Medien geringer Bandbreite zu Nutzen. Entsprechende Protokolle werden zurzeit entwickelt und erprobt.

#### Dienste mit GIS Genauigkeit

Im SAPOS wird bei den Echtzeitdiensten unterschieden zwischen EPS und HEPS. Während EPS mit einer Genauigkeit von 1–3 m spezifiziert ist, liegt die Genauigkeit beim HEPS im Bereich von 1–5 cm. Der Echtzeitpositionierungsservice (EPS) arbeitet in der Regel mit Codemessungen oder den sog. trägergeglätteten Codemessungen und erreicht mit hochwertigen Empfängern in der Praxis Genauigkeiten bis in den Submeterbereich. Der hochpräzise Echtzeitpositionierungsservice (HEPS) arbeitet mit mehrdeutigkeitsbereinigten Trägerphasen, die letztlich den Sprung der Genauigkeit um 2 Größenordnungen ermöglichen. Für HEPS kommen i. Allg. hochwertige Zweifrequenzempfänger zum Einsatz, während für EPS auch kostengünstige Einfrequenzgeräte verwendet werden.

Zwischen diesen beiden Diensten fehlt aus Nutzersicht der Genauigkeitsbereich von wenigen Dezimetern, z.B. 1–3 dm, der auch mit kostengünstigen Geräten erreicht werden kann. Viele GIS Anwendungen sind in dieser Genauigkeitsklasse angesiedelt, so dass hier ein großer Markt zu sehen ist.

Als GPS Messgröße kommt auch hier die Trägerphasenmessung zum Einsatz, die jedoch nicht wie beim HEPS mit Mehrdeutigkeitslösungen arbeitet, sondern vielmehr mit sog. "Float" Lösungen, die nach kurzer Beobachtungszeit die entsprechende Genauigkeit er-

reichen. Da keine Mehrdeutigkeitslösungen angestrebt werden, kommen diese Verfahren auch mit Einfrequenzmessungen aus. Voraussetzung ist jedoch auch hier, dass die entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse weitgehend eliminiert werden.

Prinzipiell kann für diese Anwendungen das Signal des HEPS Dienstes verwendet werden, jedoch stellt sich aus Nutzersicht die Kostenstruktur ungünstig dar, insbesondere dann, wenn GSM Datenübertragungen verwendet werden. Die im vorhergehenden Kapitel angesprochene Übertragung von Parametern im Zustandsraum ermöglicht in diesem Zusammenhang eine deutliche Kostenreduzierung.

## Hierarchische und kooperierende Netze

Die vollständige Modellierung im Zustandsraum ermöglicht den Informationsaustausch zwischen verschiedenen Netzen über die Zustandsparameter unter Einbeziehung der stochastischen Informationen. Man kann die aus einem vollständigen Modell ermittelten Zustandsgrößen mit ihrer Stochastik als transformierte Beobachtungen betrachten. Diese Transformation ist theoretisch ohne Informationsverlust möglich. Der Austausch der Zustandsinformation kann somit als gleichwertig mit dem Austausch der vollständigen Beobachtungen betrachtet werden. Hierdurch ergibt sich die Möglichkeit des Aufbaus hierarchischer oder kooperierender Netze.

Ein hierarchisches Netz kann z.B. aus einem übergeordneten, großräumigen Netz und mehreren kleinräumigen Netzen höherer Dichte bestehen. Die Zustandsinformationen aus dem übergeordneten Netz lassen sich als Stützinformation in den kleinräumigen Netzen verwenden. Die bessere Trennbarkeit von Zustandsparametern in großräumigen Netzen kann dadurch auf die kleinräumigen Netze übertragen werden. Dieses führt dort zu einer besseren Leistungsfähigkeit in Form schnellerer und zuverlässigerer Mehrdeutigkeitslösungen.

Ähnliches gilt beim Austausch von Zustandsinformationen zwischen kooperierenden Netzen. Hierbei werden zwischen Netzen etwa gleicher Größe und Dichte die Zustandsparameter ausgetauscht und jeweils zur Stützung der individuellen Filterprozesse verwendet. Man bezieht dadurch indirekt die Beobachtungen des kooperierenden Netzes in das jeweils andere Netz mit ein.

Die korrekte Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Netzen setzt eine konsistente Modellierung voraus. Hierdurch ergibt sich eine gewisse Problematik bei der Verknüpfung von Netzen, die mit Software verschiedener Hersteller betrieben werden. Als Beispiel für diese Problematik sei das IGS genannt. Hier waren im Bereich des "Postprocessing" immer wieder Modellabstimmungen erforderlich, um zu der schließlich erreichten hohen Konsistenz der Lösungen zu kommen.

#### Zusammenfassung

Die großräumige Vernetzung von GNSS Referenzstationen führt zu erhöhter Redundanz und verbesserter Zustandsschätzung. Hierdurch lassen sich die Qualität der Netze, die Netzdichte und die Bandbreite der Übertragungsmedien optimieren.

Eine konsistente vollständige Zustandsmodellierung ermöglicht die Zusammenschaltung von hierarchischen und kooperativen Netzen zur gegenseitigen Steigerung der Leis-

tungsfähigkeit.

Die Übertragung von Netzinformationen zum Nutzer in Form von Zustandsparametern kann zu einer erheblichen Reduktion der Bandbreite der Medien als auch zur Erschließung neuer Dienste im Bereich der Genauigkeit von GIS Anwendungen führen.

Die hohe Redundanz durch eine hohe Anzahl von Referenzstationen führt bei simultaner Auswertung zur Reduktion bzw. Elimination von stationsabhängigen Fehlereinflüssen.

#### Dank

Wir danken dem LGN für die freundliche Bereitstellung der Daten zur Analyse der "Sparse RTK Networks".

#### Literaturhinweise

- Böder, V., F. Menge, G. Seeber, G. Wübbena, M. Schmitz (2001). How to Deal With Station Dependent Errors New Developments of the Absolute Calibration of PCV and Phase–Multipath With a Precise Robot. To be presented at the International Technical Meeting, *ION GPS-01*, Salt Lake City, Utah.
- Euler, H.–J., C.R. Keenan, B.E. Zebhauser, G. Wübbena (2001). Study of a Simplified Approach Utilizing Information from Permanent Station Arrays. Paper presented at the International Technical Meeting, *ION GPS-01*, Salt Lake City, Utah.
- Mullerschoen, R., Bar–Server, Y. W. Bertiger, D. Stowers (2001). NASA's Global DGPS for High–Precision Users. *GPS World*, January, 14–20.
- Wübbena, G. (1991). Zur Modellierung von GPS-Beobachtungen für die hochgenaue Positionsbestimmung. Wissenschaftliche Arbeiten Fachrichtung Vermessung-swesen an der Universität Hannover, Nr. 168, Hannover.
- Wübbena, G., A. Bagge (1995). GPS-bezogene Ortungssysteme. Presented at 37. DVW-Seminar Hydrographische Vermessungen heute –, 28.–29. März 1995, Hannover. *Schriftenreihe des DVW*, Band 14, Verlag Konrad Wittwer, 43.
- Wübbena, G. A. Bagge (1997). Neuere Entwicklungen zu GNSS-RTK für optimierte Genauigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit Referenzstationsnetze und Multistations- RTK-Lösungen. 46. DVW-Seminar, Praxis und Trends '97, 29.9.–1.10.1997, Frankfurt a.M., *Schriftenreihe des DVW*, Band 35, Verlag Konrad Wittwer.
- Wübbena. G., S. Willgalis (2001). State Space Approach for Precise Real Time Positioning in GPS Reference Networks. Presented at International Symposium on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics and Navigation, *KIS-01*, Banff, June 5–8, Canada.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber, V. Böder, P. Hankemeier (1996). Reducing Distance Dependent Errors for Real–Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. Proceedings of the International Technical Meeting, *ION GPS*–96, Kansas City, Missouri, 1845–1852.
- Wübbena, G., A. Bagge, G. Seeber (1995). Developments in Real-Time Precise DGPS Applications Concepts and Status. Paper presented at the *IAG Symposium G1*, *IUGG General Assembly*, July 1995, Boulder, Colorado, USA.
- Wübbena, G., M. Schmitz, F. Menge, V. Böder, G. Seeber (2000). Automated Absolute

- Field Calibration of GPS Antennas in Real-Time. Presented at International Technical Meeting *ION GPS-00*, 19–22 September, Salt Lake City, Utah, USA.
- Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz (2001). RTK Networks based on Geo++ GNSMART Concepts, Implementation, Results. Paper presented at the International Technical Meeting, *ION GPS-01*, Salt Lake City, Utah.
- Wübbena, G. (2002). Sparse RTK Networks with Geo++ GNSMART. Paper presented at the Network RTK Workshop, March 12, 2002, Gävle, Sweden.
- Zumberge, J., M. Heflin, D. Jefferson, M. Watkins, F. Webb, F. (1997). Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *Journal Geophysical Research*, 102, B3.