

Virtuelle GPS-Referenzstationen für großräumige kinematische Anwendungen

Lambert Wanninger

Zusammenfassung

In regionalen Netzen von GPS-Referenzstationen werden heutzutage die Beobachtungsdaten netzweise vorverarbeitet, um Beobachtungen nutzer-individueller virtueller Referenzstationen (VRS) zu erzeugen. Diese virtuellen Beobachtungen ermöglichen dem Nutzer, cm-genaue Positionierung basislinienweise durchzuführen, auch wenn die nächste reale Referenzstation mehrere 10er km entfernt liegt. In diesem Beitrag wird das Konzept der statischen VRS um das der semi-kinematischen VRS erweitert, welches für kinematische Anwendungsfälle, bei denen der Nutzer größere Entfernungen zurücklegt, gültig ist. Anhand von Beispieldatensätzen wird gezeigt, dass semi-kinematische VRS den statischen VRS bei großräumigen kinematischen Anwendungen überlegen sind.

Summary

Advanced GPS positioning techniques pre-process the observations of regional reference station networks in order to provide individual virtual reference station (VRS) observations. These virtual observations enable users to perform cm-level positioning in baseline mode, even with the real reference stations situated in distances of several 10 km. This paper extends the concept of static VRS to that of a semi-kinematic VRS to be used in such cases of kinematic positioning, where the rover receiver moves across long distances. Test data sets were used to evaluate the performance of this new kind of VRS. The results demonstrate its superiority to static VRS in large-scale kinematic applications.

1 Einleitung

Um in Netzen von Referenzstationen (RS) mit GPS- oder GLONASS- oder in Zukunft Galileo-Empfängern und Stationsabständen zwischen 30 und 100 km zentimetergenaue Koordinaten in kinematischem oder kurzzeitig statischem Messmodus zu erzielen, ist die Vorverarbeitung der Referenzdaten notwendig. Dabei werden für die Position des Nutzers optimierte Beobachtungen einer sogenannten Virtuellen Referenzstation (VRS) erzeugt. Dafür sind präzise Korrekturmodelle für relative Beobachtungsfehler der entfernungsabhängig wirkenden Fehlerquellen (ionosphärischen und troposphärischen Laufzeitfehlern sowie Orbitfehlern) notwendig, die aus den Referenzstationsbeobachtungen erzeugt werden (Wanninger 1997).

Dieses Konzept wird heutzutage im Allgemeinen dadurch verwirklicht, dass die komplette Datenvorverarbeitung eines RS-Netzes in einem Rechenzentrum erfolgt. Der Nutzer überträgt dorthin seine Näherungsposition

und erhält dann VRS-Beobachtungen, die sich auf diese Position beziehen. Er selbst positioniert sich im klassischen Basislinienverfahren relativ zu diesen VRS-Beobachtungen (Trimble 2001).

Dieses Konzept wurde für solche Nutzer entwickelt, die statisch oder kleinräumig kinematisch arbeiten. Dann ist eine einzige VRS-Wunschposition, die am Beginn eines Arbeitsabschnittes dem Rechenzentrum übermittelt wird, ausreichend. Bewegt sich der Nutzer aber über größere Distanzen, müsste er regelmäßig seine Position aufdatieren und die VRS entsprechend nachgeführt werden. Eine dafür notwendige bewegliche Referenzstation wird aber bei der sich anschließenden Basislinienauswertung durch die existierenden Softwarepakete nicht akzeptiert. Das Konzept der VRS muss also erweitert werden, um großräumige kinematische Anwendungen optimal bearbeiten zu können.

2 Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen

Die Vorverarbeitung der Beobachtungen eines RS-Netzes umfasst zwei Hauptarbeitsschritte: die Mehrdeutigkeitslösung im RS-Netz und die sich daran anschließende Modellierung der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse (Abb. 1). Verschiedene Arten von Modellierungsansätzen wurden in den letzten Jahren vorgeschlagen. Vergleiche zeigen, dass die Qualität der damit erzielbaren Ergebnisse im Allgemeinen sehr ähnlich ist (Dai u. a. 2001). Vielfach wird eine getrennte Modellierung nach relativen ionosphärischen Fehlern einerseits und relativen geometrischen (also troposphärisch und durch Orbitfehler bedingten) Fehlern andererseits vorgenommen. Die Korrekturmodellparameter werden im Allgemeinen als Flächenkorrekturparameter (FKP) bezeichnet.

Die VRS-Beobachtungen werden aus einem Satz von Beobachtungen (oder Beobachtungskorrekturen entsprechend der RTCM-Formatbeschreibung, siehe RTCM (2001)) und den FKP berechnet. Dieser eine Satz von Beobachtungen soll hier als Beobachtungsdatensatz einer Master-RS bezeichnet werden. Er besteht entweder aus den Beobachtungen einer ausgewählten realen RS oder er wird aus den Daten einer Gruppe von RS gewonnen. Im zweiten Fall können Beobachtungslücken und Mehrwegeeffekte verringert werden.

Die Qualität der VRS-Beobachtungen hängt entscheidend davon ab, inwieweit die realen Beobachtungen durch stationsabhängige Fehlereinflüsse, im wesentlichen Phasenmehrwegeeffekte, betroffen sind. Weiter-

hin ist von Bedeutung, inwieweit die entfernungsabhängigen Einflüsse durch ihre flächenhafte Modellierung erfasst werden konnten. Restfehler sind immer dann zu erwarten, wenn kleinräumige Störungen in Ionosphäre oder Troposphäre auftreten. Solche Restfehler erschweren die Mehrdeutigkeitslösung in der Basislinie zwischen VRS und Nutzerstation und vergrößern die dort auftretenden Koordinatenfehler (Wanninger 1999). Die Größe eventueller Restfehler und damit die Qualität der VRS wird bei der Berechnung der Korrekturmodellparameter abgeschätzt. Diese Information sollte in die Basislinienberechnung zwischen VRS und Nutzerstation einfließen.

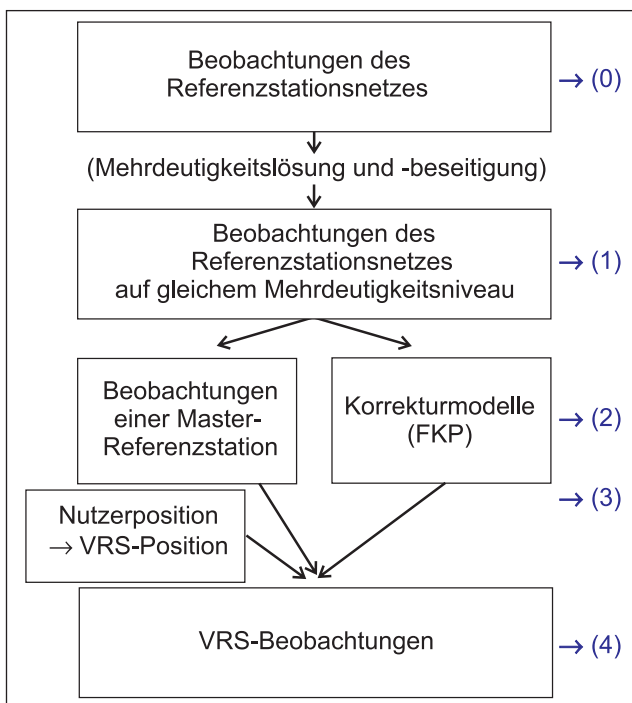


Abb. 1: Schritte zur Berechnung von VRS-Beobachtungen.

Die Berechnung der VRS-Beobachtungen muss nicht unbedingt vollständig in einem zentralen Rechenzentrum durchgeführt werden, so wie das augenblicklich meist geschieht. Sie kann auch zwischen zentralem Rechenzentrum und Nutzer aufgeteilt werden. Je nach gewählter Aufteilung müssen unterschiedliche Daten vom Rechenzentrum zum Nutzer übermittelt werden. Folgende Ansätze existieren oder werden diskutiert (vgl. Abb. 1):

- (0) **Übertragung aller Referenzdaten zum Nutzer:** Hierbei werden entweder die Originaldaten übertragen oder zur Reduktion des Datenvolumens der vollständige Beobachtungsdatensatz einer Master-RS und Beobachtungsdifferenzen für alle anderen RS. Es findet dabei keine Datenvorverarbeitung entsprechend Abbildung 1 im Rechenzentrum statt. Alle Berechnungen erfolgen auf der Nutzerseite. Dieses Verfahren wird augenblicklich häufig im *Postprocessing* eingesetzt, weil es auf Seiten der RS-Netzbetreiber keine Veränderungen notwendig macht.
- (1) **Referenzstationsnetzbeobachtungen auf gleichem Mehrdeutigkeitsniveau:** Übertragung der Beobach-

tungen der Master-RS und von Beobachtungsdifferenzen weiterer RS nach einer Mehrdeutigkeitslösung und -beseitigung (Euler u. a. 2002). Auf Nutzerseite können dann direkt die Korrekturmodelle gerechnet werden und anschließend die VRS-Beobachtungen, die dann der basislinienweisen Positionierung dienen.

- (2) **FKP:** Übertragung der Beobachtungen einer Master-RS und von FKP (Wübbena u. a. 2000). Der Nutzer korrigiert die RS-Beobachtungen mit Hilfe der FKP entsprechend seiner Position und erhält so VRS-Beobachtungen. Das notwendige Datenformat wurde bisher nicht standardisiert. Es existiert aber eine Vereinbarung zwischen Softwareherstellern über einen RTCM Datentyp 59, der die FKP-Informationen enthält.
- (3) **Korrekturen für Rasterpunkte:** Übertragung der Beobachtungen einer Master-RS und Korrekturen der entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse für Punkte eines Rasters (Townsend u. a. 2000). Der Nutzer interpoliert seine individuellen Korrekturen innerhalb des Rasters, bringt sie an die Master-RS-Beobachtungen an und erhält so seine individuellen VRS-Beobachtungen.
- (4) **VRS:** Der Nutzer sendet seine Näherungsposition in das Rechenzentrum und erhält von dort individuelle VRS-Beobachtungen, die er dann für basislinienweise Positionierung verwendet. Dieser Ansatz wird augenblicklich viel verwendet, da existierende Datenformate (RTCM für Echtzeit, RINEX für *Postprocessing*) eingesetzt werden können.

Bei den Ansätzen (0) bis (3) hat der Nutzer die Möglichkeit, Informationen über die Qualität der VRS-Beobachtungen entweder aus der Berechnung der Korrekturmodelle oder aus der Analyse der ihm übermittelten FKP-Werte abzuleiten. Dies ermöglicht ihm, die Größe verbliebener Fehler der entfernungsabhängig wirkenden Einflüsse abzuschätzen und in seiner Basislinienberechnung zu berücksichtigen. Entsprechende Möglichkeiten hat er beim Empfang von VRS-Beobachtungen nur dann, wenn zusätzlich Qualitätsinformationen mitübermittelt werden. Da dies aber in aller Regel nicht geschieht, besteht die Gefahr, dass die Basislinienberechnung nicht optimal durchgeführt werden kann.

Hauptnachteil der Verfahren (1) bis (3) ist die bisher nicht vorhandene Existenz von standardisierten Datenformaten zur Übermittlung der notwendigen Informationen. Innerhalb des RTCM sind die Diskussionen aber schon weit fortgeschritten, so dass in naher Zukunft mit einer Standardisierung gerechnet werden kann. Favorisiert wird ein Format, welches dem Ansatz (2) entspricht (Euler u. a. 2002). Solange eine solche Standardisierung noch nicht vollzogen wurde, werden die vorverarbeiteten Netzinformationen bevorzugt in der Form von VRS-Beobachtungen übertragen werden. Dies gilt insbesondere auch für *Postprocessing*-Anwendungen, da eine entsprechende Erweiterung des RINEX-Formats nicht zur Diskussion steht.

3 Virtuelle Referenzstationen für kinematische Anwendungen

Das oben beschriebene VRS-Konzept wurde für solche Nutzer entwickelt, die statisch oder kleinräumig kinematisch arbeiten, wie es z. B. bei RTK-Vermessung (*Real-Time Kinematic*: cm-genaue Echtzeit-Vermessung) üblich ist. Dann ist eine einzelne Näherungsposition des Nutzers, die als VRS-Wunschposition in die Berechnung der VRS-Beobachtungen einfließt, ausreichend. Bewegt sich der Nutzer aber über größere Distanzen, müsste die VRS-Wunschposition regelmäßig nachgeführt werden. Eine dafür notwendige bewegliche Referenzstation wird aber bei der sich anschließenden Basislinienauswertung durch die existierenden Softwarepakete nicht akzeptiert. Im günstigsten Fall wird die Basislinien-Mehrdeutigkeitslösung mit jeder Koordinatenänderung der Referenzstation reinitialisiert und dadurch unnötig erschwert.

Ein erweitertes VRS-Konzept für großräumige kinematische Anwendungen beseitigt diese Probleme. Dabei werden die VRS-Beobachtungen einerseits immer auf die selbe feste Position bezogen, aber andererseits die Korrekturen für entfernungsabhängige Fehler entsprechend der tatsächlichen Nutzerpositionen angebracht (Abb. 2). Da diese Art der VRS teilweise Eigenschaften einer statischen RS besitzt und gleichzeitig in ihrem Fehlerverhalten einem bewegten Empfänger entspricht, wird sie semi-kinematische VRS genannt.

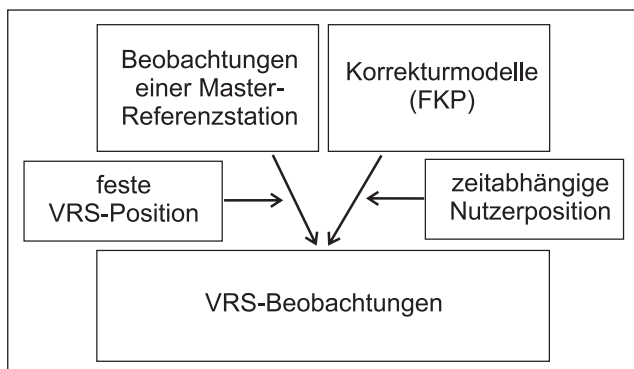


Abb. 2: Erweiterung des VRS-Konzepts für Beobachtungen einer semi-kinematischen VRS.

Während eine statische VRS die Eigenschaften einer realen Referenzstation simuliert, weist eine semi-kinematische VRS Eigenschaften auf, die durch reale Messungen nicht erzeugt werden können. Sie darf deswegen nur als Referenz für die kinematische Nutzerstation verwendet werden, für die sie erstellt wurde. Die Verwendung derselben semi-kinematischen VRS-Beobachtungen für die Auswertung anderer Messungen ist nicht zu empfehlen.

In der Basislinienberechnung zwischen semi-kinematischer VRS und dem Nutzerempfänger muss berücksichtigt werden, dass die Referenzdaten aus einem RS-Netz stammen und entfernungsabhängige Fehlereinflüsse so gut wie möglich korrigiert worden sind. Das bedeutet einerseits, dass die scheinbare Länge der Basislinie bei

der Wahl des Auswertalgorithmus und der notwendigen -parameter ignoriert werden sollte. Andererseits sollte die Größe eventueller Restfehler der Korrekturen berücksichtigt werden. Aber selbst wenn diese beiden Besonderheiten keine Berücksichtigung finden, profitiert die Basislinienauswertung vom Einsatz semi-kinematischer VRS.

Für Echtzeitanwendungen und eine Erzeugung von semi-kinematischen VRS-Beobachtungen in einem Rechenzentrum muss der Nutzer seine Näherungsposition regelmäßig dorthin übertragen. Es ist also eine kontinuierliche Zweiwege-Kommunikation notwendig, welches bei der heute üblichen Datenübertragung mit Mobiltelefon kein Problem darstellt.

4 Beispiele

Zwei kinematische Beispieldatensätze wurden ausgewählt, die eine detaillierte Analyse zu unterschiedlichen Arten von Referenzstationen ermöglichen. In beiden Fällen konnte auf SAPOS-Referenzstationen der deutschen Landesvermessungsämter zurückgegriffen werden, deren Stationsabstand in der Größenordnung von 50 km liegt. Lokale Referenzstationen wurden temporär betrieben, da ursprünglich nicht geplant war, auf das RS-Netz zurückzugreifen.

Vier Arten von kinematischen Basislinienlösungen wurden berechnet und im Detail untersucht. Sie unterscheiden sich in den dabei verwendeten Referenzstationen. Betrachtet wurden:

- **nächste permanente Referenzstation:** Dies ist die in der Praxis bevorzugt gewählte RS, wenn keine temporäre lokale RS existiert und die VRS-Technik nicht eingesetzt wird,
- **temporäre lokale Referenzstation:** Sie wird im Zentrum des Arbeitsgebietes aufgebaut, so dass die maximale Entfernung zur Nutzerstation möglichst gering ist. Ziel von RS-Netzen und der VRS-Technik ist es, solche temporären RS überflüssig zu machen.
- **statische VRS:** Sie basiert auf den Beobachtungen der umliegenden realen RS. Ihre Position wird so gewählt, dass die maximale Entfernung zum kinematischen Nutzer möglichst gering ausfällt. Diese maximalen Entfernungen sind geringer als die bei Verwendung einer lokalen RS, da hier keinerlei andere Restriktionen für die Positionswahl existieren.
- **semi-kinematische VRS:** Auch sie basiert auf den Daten der umliegenden realen RS, wobei hier nun optimale Beobachtungen für den kinematischen Anwender erzeugt wurden. Ihre feste Position kann frei gewählt werden. In den hier gezeigten Beispielen wurde die Position der statischen VRS auch für die semi-kinematische VRS verwendet.

Die VRS-Beobachtungen wurden mit dem *Postprocessing*-Softwarepaket WaSoft/Virtuell erzeugt. Die Software arbeitet auf der Basis von undifferenzierten Be-

obachtungen und ist somit für Netzlösungen besonders geeignet. Für die folgenden Untersuchungen wurde der Berechnungsmodus für statische VRS erweitert, so dass auch semi-kinematische VRS berechnet werden können. VRS-Beobachtungen werden im RINEX-Format erzeugt, so dass die anschließende Basislinienberechnung mit beliebigen Softwarepaketen durchgeführt werden kann. In diesem Falle wurde dafür WaSoft/K eingesetzt. Bei allen Berechnungen wurde eine Elevationsmaske von 10 Grad verwendet.

Zur Verminderung stationsabhängiger Fehlereinflüsse ist es unbedingt notwendig, Korrekturen der Antennenphasenzentren anzubringen. Dies gilt bei beiden Beispielen um so mehr, da eine Vielzahl von unterschiedlichen Antennentypen Verwendung fanden. Unter Verwendung von Korrekturen für elevationsabhängige Phasenzentrumsvariationen der Nutzerantennen wurden den VRS-Stationen Antennen zugewiesen, die mit den Nutzerantennen identisch sind. So sind die Basislinien zwischen VRS und Nutzer weitestgehend frei von Phasenzentrumsfehlern.

Bei beiden folgenden Beispielen bewegt sich der Nutzer innerhalb eines Dreiecks von Referenzstationen. Die Technik der semi-kinematischen VRS ist aber auch problemlos anwendbar, wenn der Nutzer sich noch großräumiger bewegt. Flächenkorrekturparameter werden dann entweder aus mehr als drei Referenzstationen bestimmt oder es wird für jedes Dreieck von Referenzstationen ein FKP-Datensatz erstellt. Dabei treten an den Außenkanten von FKP-Datensätzen für benachbarte Dreiecke keine Sprünge auf. Nur beim Wechsel der Master-Referenzstation ist mit kleinen (sub-Zentimeter) Unstetigkeiten zu rechnen, die durch Unterschiede der Mehrwegeeinflüsse, der Antennen und Restfehlern der Referenzstationskoordinaten verursacht werden.

4.1 Beispiel 1: Autobahnvermessung

Der erste Beispieldatensatz entstammt einer Autobahnvermessung, bei der die Fahrzeugpositionierung mit GPS durchgeführt wurde. Die Daten wurden am 24. November 1999 südwestlich von Berlin auf einem Autobahnabschnitt der A9 gesammelt. Zwei GPS-Antennen waren auf dem Dach des Messfahrzeuges in einem Abstand von 0,70 m montiert. Eine Antenne war mit einem Trimble 4700-Empfänger verbunden, die zweite mit einem Trimble SSE.

Das Fahrzeug befuhr den Autobahnabschnitt von 12,5 km Länge in beiden Richtungen (Abb. 3). Seine durchschnittliche Geschwindigkeit betrug 50 km/h. Um Signalunterbrechungen durch Bäume am Straßenrand möglichst gering zu halten, wurde ausschließlich auf der Überholspur gefahren. Trotzdem traten viele Signalunterbrechungen aufgrund von Brücken oder Bäumen auf. Das kürzeste Teilstück kontinuierlicher Beobachtungen betrug etwa 100 Sekunden. Die längsten Teilstücke sind ei-

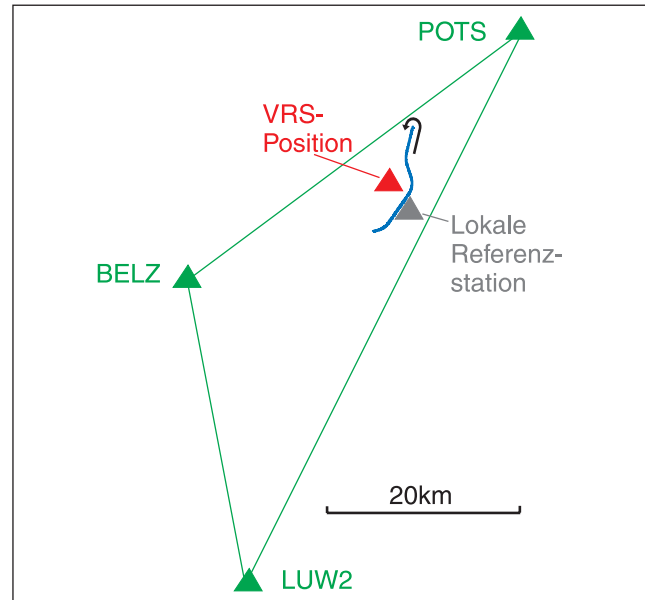


Abb. 3: Lage der Referenzstationen und Weg des Messfahrzeugs für Beispiel 1.

nige Minuten lang. Der Trimble SSE verlor häufiger die Signale als der Trimble 4700 und brauchte einen längeren Zeitraum um anschließend wieder Zweifrequenzmessungen durchführen zu können. Auf dem Rückweg wurde die Fahrt viermal unterbrochen, um Punkte statisch aufzunehmen. Diese Zeitabschnitte sind in Abbildung 5 und in Tabelle 1 nicht enthalten.

Es wurde eine temporäre lokale Referenzstation (Trimble 4000 SSI) in unmittelbarer Nähe zur Autobahn betrieben (Abb. 3). Bei der Wahl ihres Standorts war insbesondere auf eine mehrwegearme Umgebung geachtet worden. Die Beobachtungen der drei umliegenden permanenten RS des SAPOS-Netzes (Abb. 3) wurden durch die Landesvermessungsämter Brandenburg und Sachsen-Anhalt zur Verfügung gestellt. Statische und semi-kinematische VRS wurden auf der Grundlage dieser Beobachtungsdaten berechnet.

Die bei der VRS-Berechnung als Zwischenergebnis erhaltenen FKP zeigen Größe und zeitliche Variationen der relativen ionosphärischen, troposphärischen und Orbitfehlereinflüsse (Abb. 4). Während im Messzeitraum die geometrischen Korrekturen recht gering ausfallen, sind starke ionosphärische Störungen mittlerer Größe zu erkennen, von denen die Signale von sechs der elf Satelliten betroffen sind. Die ionosphärischen Korrekturen erreichen Werte von mehr als 10 ppm(L₁) bezogen auf die Stationsentfernung. Es ist bekannt, dass sich solche ionosphärischen Störungen in Referenzstationsnetzen mit einem Stationsabstand in der Größenordnung von 50 km nicht vollständig erfassen lassen (Wanninger 1999). Von daher ist in der Basislinie zwischen VRS und Nutzerstation mit ionosphärischen Restfehlern zu rechnen, die bei der Basislinienauswertung berücksichtigt werden müssen.

Die Mehrdeutigkeitslösung konnte in den Basislinien zwischen lokaler RS bzw. den VRS und dem Trimble

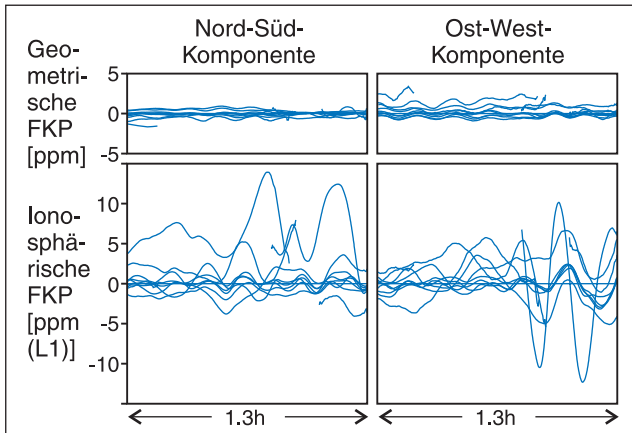


Abb. 4: Geometrische und ionosphärische Flächenkorrekturparameter für Beispiel 1.

4700-Empfänger vollständig durchgeführt werden. Probleme traten aber in der langen Basislinie zur permanenten Referenzstation POTS auf. Um auch für diese Basislinie eine vollständige Mehrdeutigkeitslösung zu erreichen, wurden in den Auswerteprozess die präzisen Koordinaten der Nutzerantenne eingeführt, die sich als Ergebnis der anderen Basislinienauswertungen ergeben hatten.

Nach vollständiger Mehrdeutigkeitslösung war es möglich, Doppel-Differenz-Residuen aller vier Basislinien zu berechnen (Abb. 5). Die Residuen der ionosphären-freien Linearkombination L_0 zeigen vornehmlich den Einfluss stationsabhängiger Fehler, welche im wesentlich durch Phasenmehrwegeeffekte erzeugt werden. Die kleinsten Residuen treten in der Basislinie zur lokalen RS auf. Dies deutet darauf hin, dass die lokale RS weit weniger durch Mehrwegeeffekte betroffen ist als die permanenten RS, die sich alle auf Hausdächern befinden, auf

denen bekanntermaßen häufig starke Mehrwegeeffekte auftreten. Die Größe der ionosphären-freien Residuen ist von der Basislinienlänge unabhängig. Die geometrischen Korrekturen sind also von geringer Bedeutung.

Die Doppel-Differenz-Residuen der L_1 -Frequenz werden sowohl von relativen ionosphärischen wie auch stationsabhängigen Fehlern verursacht. Die größten Residuen finden sich in der langen Basislinie zur permanenten RS (POTS). Sie bereiteten große Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung (vgl. Tab. 1). Die kleinsten L_1 -Residuen treten in der Basislinie zur lokalen RS auf. Hier wirken sich sowohl die kurze Basislinienlänge wie auch die geringen stationsabhängigen Fehlereinflüsse der lokalen RS positiv aus.

Obwohl der Abstand der statischen VRS zur Nutzerstation 6 km nicht übersteigt, können die L_1 -Residuen beim Übergang zur semi-kinematischen VRS um 10% verringert werden. Diese Genauigkeitssteigerung führt potentiell zu einer Verbesserung der Mehrdeutigkeitslösung.

Mit WaSoft/K wurden Koordinatenlösungen für insgesamt acht Basislinien erzeugt, nämlich zwischen vier Arten von Referenzstationen und den beiden Antennen auf dem Messfahrzeug. Die Korrektheit der Mehrdeutigkeitslösungen wurde mit Hilfe der festen Distanz zwischen den beiden Antennen überprüft. Aufgrund der schlechteren Datenqualität des Trimble 4000 SSE im Vergleich zum Trimble 4700 gab es für den erstgenannten Empfänger die größeren Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung.

Wie schon aus der Interpretation der Beobachtungsresiduen zu erwarten war, gab es in der langen Basislinie zur permanenten Referenzstation POTS die größten Probleme bei der Mehrdeutigkeitslösung (Tab. 1). Die Basis-

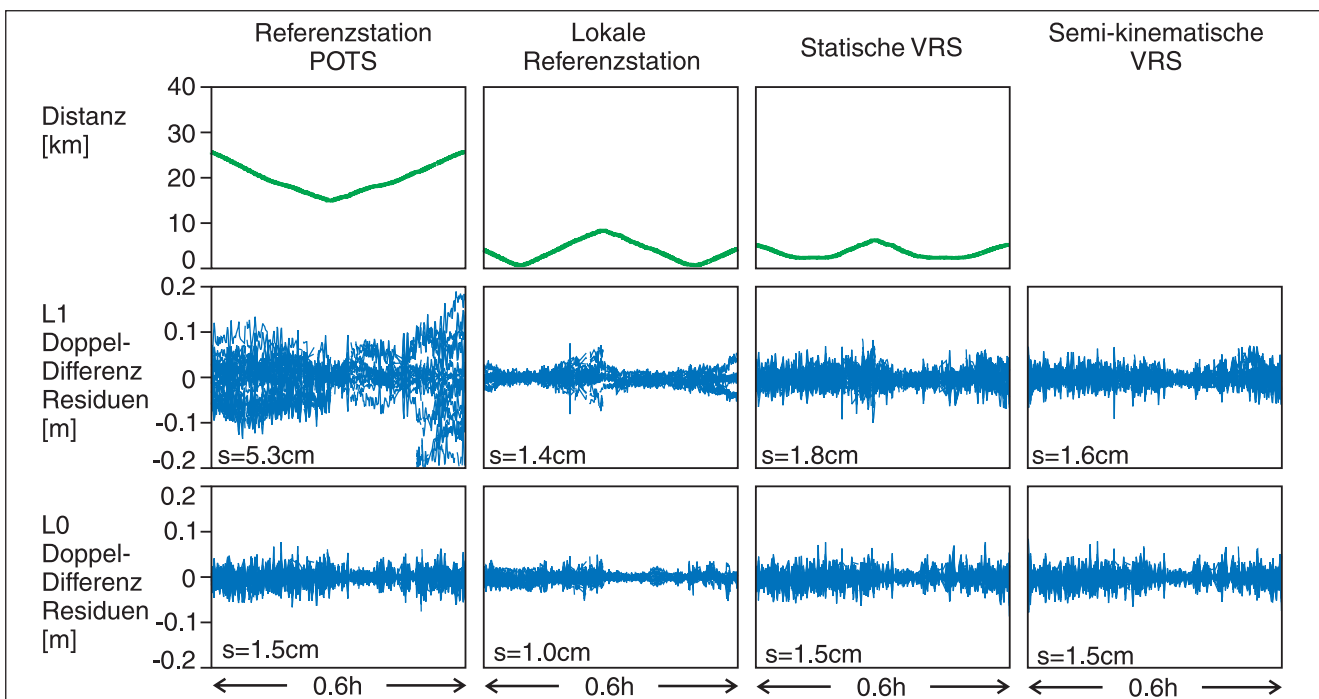


Abb. 5: Vergleich von Basislinienlösungen zu vier Arten von Referenzstationen für Beispiel 1: Abstand zur Referenzstation, Doppel-Differenz-Residuen für L_1 und für die ionosphären-freie Linearkombination L_0 .

Tab. 1: Prozentsatz der Epochen mit korrekter Mehrdeutigkeitsfestsetzung in den Basislinien zu beiden kinematisch betriebenen GPS-Empfangssystemen des Beispiels 1.

Referenzstation POTS	81
Lokale Referenzstation	95
Statische VRS	93
Semi-kinematische VRS	93

linien zu den beiden VRS-Arten schneiden vergleichbar ab und nur wenig schlechter als die Basislinie zur lokalen RS, welche von den geringen stationsabhängigen Fehlern an der lokalen RS profitiert.

VRS-Beobachtungen höherer Qualität wären erzielbar, wenn die stationsabhängigen Fehlereinflüsse, also insbesondere Phasemehrwegeeffekte, auf den realen Referenzstationen verringert werden würden. Trotzdem zeigt sich auch schon bei den hier verwendeten Daten, dass VRS-Beobachtungen temporäre lokale RS überflüssig machen.

4.2 Beispiel 2: Flugzeugpositionierung

Der zweite Beispieldatensatz entstammt einem Testflug über Vaihingen/Enz bei Stuttgart, der am 6. Juni 2000 durchgeführt wurde. Dabei wurde im Flugzeug ein GPS-Empfänger (Ashtech UZ-12) und ein Inertialmesssystem eingesetzt. Die hier präsentierten Resultate basieren nur auf den GPS-Messungen. Zur Datenauswertung wurden neben den Beobachtungen eines temporären lokalen RS-Empfängers auch die Daten der drei umliegenden SAPOS-RS verwendet (Abb. 6). Wie im vorherigen Beispiel wurden Basislinien von vier unterschiedlichen Arten von RS zum Flugzeug gebildet und verglichen: von der nächsten permanenten RS (STUT), von der lokalen RS, von einer statischen VRS und von einer semi-kinematischen VRS.

Die Flugdaten weisen eine ausgesprochen gute Qualität auf. Es sind fast keine Signalunterbrechungen aufgetreten, so dass kontinuierliche Phasendaten über 2,3 Stunden vorliegen. Dementsprechend stellt die Mehrdeutigkeitslösung in keiner der vier Basislinien ein Problem dar.

Die VRS-Beobachtungen beruhen auf den Beobachtungen der drei umliegenden permanenten RS. Beide Arten von VRS beziehen sich auf die selbe feste Position am Boden (Abb. 6). Für die Berechnung der semi-kinematischen VRS wurden zusätzlich die horizontalen Komponenten der Flugzeugpositionen verwendet. Die geometrischen FKP erreichen bis zu 3 ppm. Die ionosphärischen FKP übersteigen 6 ppm(L₁) nicht (Abb. 7).

Die größten Doppel-Differenz-Residuen treten in der langen Basislinie zur permanenten Referenzstation STUT auf, die kleinsten in der Basislinie zur semi-kinematischen VRS (Abb. 8). Lokale RS und statische VRS weisen von den Basislinienresiduen her eine gleiche Qualität auf.

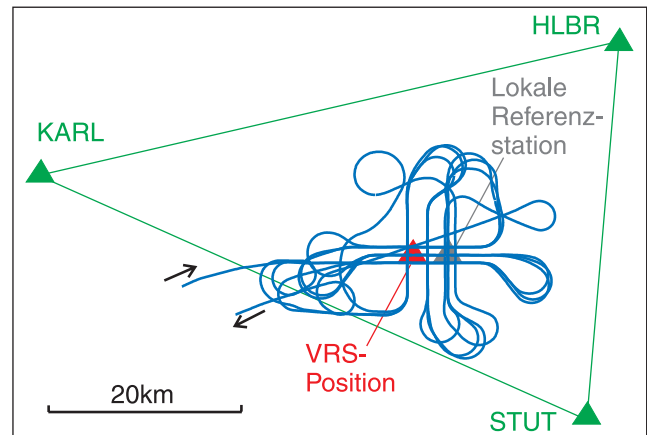


Abb. 6: Lage der Referenzstationen und Flugweg für Beispiel 2.

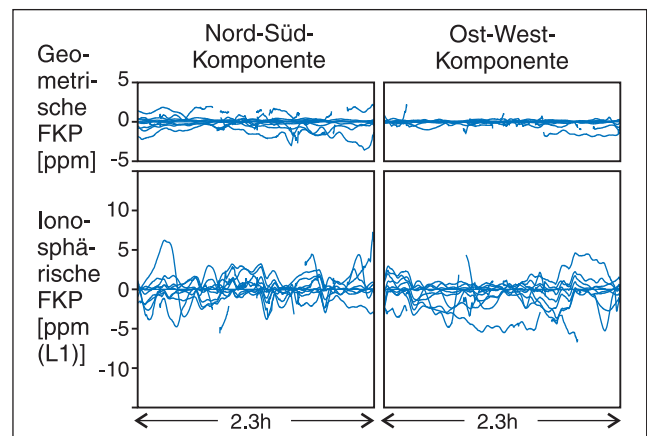


Abb. 7: Geometrische und ionosphärische Flächenkorrekturparameter für Beispiel 2.

Unterschiede zwischen den vier Basislinien sind in L₁ aufgrund ionosphärischer Einflüsse stärker ausgeprägt, während für die ionosphären-freie Linearkombination kaum Unterschiede feststellbar sind.

Je kleiner die Doppel-Differenz-Residuen ausfallen, um so schneller und zuverlässiger gelingt die Mehrdeutigkeitslösung. Wie schon erwähnt, stellte in diesem Beispiel die Mehrdeutigkeitslösung bei 2,3 Stunden kontinuierlicher Phasendaten kein Problem dar. Verwendet man dagegen nur kurze Zeitabschnitte von 5 bis 20 Minuten, so werden auch bei der Mehrdeutigkeitslösung Unterschiede zwischen den vier Basislinien deutlich (Tab. 2). Mit jeweils 5 Minuten Beobachtungen gelingt die Mehrdeutigkeitslösung in der langen Basislinie nach STUT nur

Tab. 2: Prozentsatz der Epochen mit korrekter Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei unterschiedlich langen Beobachtungsteilstücken des Beispieldatensatzes 2.

Beobachtungsdauer [min]	5	10	20
Anzahl Teilstücke	28	14	7
Referenzstation STUT	46	64	86
Lokale Referenzstation	89	93	100
Statische VRS	89	93	100
Semi-kinematische VRS	93	93	100

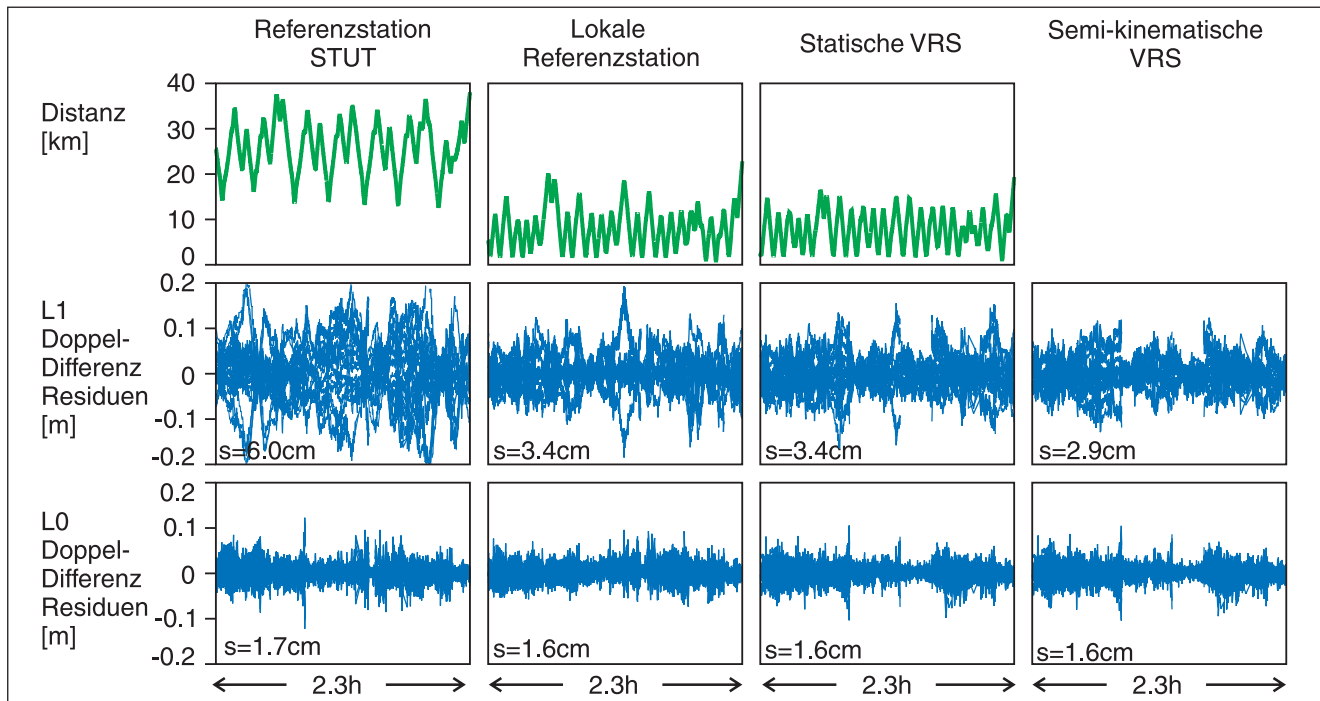


Abb. 8: Vergleich von Basislinienlösungen zu vier Arten von Referenzstationen für Beispiel 2: Abstand zur Referenzstation, Doppel-Differenz-Residuen für L_1 und für die ionosphären-freie Linearkombination L_0 .

in 50% aller Teilstücke. Dagegen übersteigt der entsprechende Wert für die semi-kinematische VRS 90%. Bei 20 Minuten Beobachtungen verbleibt für die Basislinie nach STUT noch ein Teilstück, bei dem aufgrund der großen ionosphärischen Restfehler mit WaSoft/K keine eindeutige Lösung gefunden werden konnte. Bei allen anderen Basislinien gelingt mit 20 Minuten Beobachtungen die Mehrdeutigkeitslösung vollständig und korrekt.

5 Schlussfolgerungen

Bei großräumiger kinematischer Positionierung in regionalen Referenzstationsnetzen gelingt mit einer semi-kinematischen virtuellen Referenzstationen (VRS) eine bessere Verminderung der entfernungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse als mit einer statischen VRS. Die Verwendung einer semi-kinematischen VRS führt deswegen zu einer schnelleren und zuverlässigeren Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten in der Basislinie zwischen VRS und kinematischem Nutzer.

Temporäre lokale Referenzstationen werden durch den Einsatz von virtuellen Referenzstationen in regionalen Netzen mit Stationsabständen von 30 bis 100 km überflüssig. Bei einer sorgfältigen Standortwahl können aber lokale Referenzstationen bessere Eigenschaften aufweisen als die permanenten Referenzstationen auf Hausdächern, da deren Beobachtungsdaten oft durch starke Phasenmehrwegeeffekte beeinflusst werden. Hier besteht noch ein beträchtliches Potential zur Qualitätsverbesserung der Beobachtungen permanenter Referenzstationen.

Dank

Die Autobahndaten wurden durch die Niederlassung Leipzig der Firma GEO-METRIK-Vermessung-GmbH gesammelt und zur Verfügung gestellt. Die Flugdaten wurden von der Firma IGI mbH, Kreuztal erzeugt. Die Beobachtungen permanenter GPS-Referenzstationen stammen aus den SAPOS-Netzen der Landesvermessungsämter Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Baden-Württemberg.

Literatur

- Dai, L., S. Han, J. Wang, C. Rizos: A Study on GPS/GLONASS Multiple Reference Station Techniques for Precise Real-Time Carrier Phase Based Positioning. ION GPS 2001, Salt Lake City, 392–403, 2001.
- Euler, H.-J., B. E. Zehhauser, B. R. Townsend, G. Wübbena: Comparison of Different Proposals for Reference Station Network Information Distribution Formats. ION GPS 2002, Portland, im Druck, 2002.
- RTCM: RTCM Recommended Standards for Differential GNSS Service, Version 2.3. RTCM Paper 136-2001/SC 104-STD, Alexandria VA, 2001.
- Townsend, B., K. Van Dierendonck, J. Neumann, I. Petrovski, S. Kawaguchi, H. Torimoto: A Proposal for Standardized Network RTK Messages. ION GPS 2000, Salt Lake City, 1871–1878, 2000.
- Trimble: Trimble Virtual Reference Station VRS. Broschüre, 2001.
- Wanninger, L.: Real-Time Differential GPS Error Modelling in Regional Reference Station Networks. Proc. IAG Scientific Assembly, IAG Symp. 118, Springer Verlag, 86–92, 1997.
- Wanninger, L.: Der Einfluss ionosphärischer Störungen auf die präzise GPS-Positionierung mit Hilfe virtueller Referenzstationen. zfv, 124: 322–330, 1999.
- Wübbena, G., A. Bagge, M. Schmitz: Referenzstationsnetze und internationale Standards. 3. SAPOS-Symp., München, 14–23, 2000.

Anschrift des Autors

Dr.-Ing. habil. Lambert Wanninger
 Ingenieurbüro Wanninger
 Melsbacher Str. 2, 56567 Neuwied
 www.wasoft.de