

# Verwendung virtueller Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen<sup>1</sup>

Lambert Wanninger und Jens Böhme, Dresden

## Zusammenfassung

Die relative GPS-Positionierung in Netzen von Referenzstationen bietet gegenüber der heute üblichen Verwendung von einzelnen Referenzstationen Vorteile bei der Mehrdeutigkeitslösung und den erzielbaren Koordinatengenauigkeiten. Die optimale Ausnutzung der Informationen eines Referenzstationsnetzes gelingt mit der Erzeugung von Beobachtungen von virtuellen Referenzstationen. Mit ihrer Hilfe konnten im gesamten Gebiet einer 30x40 km<sup>2</sup> großen Netzschleife mit nur jeweils 5 Minuten Beobachtungen Genauigkeiten von 1,0 cm in der Lage und 1,5 cm in der Höhe erzielt werden.

## 1 Einleitung

Die präzise (cm-genaue) relative GPS-Positionierung erfolgt heutzutage im allgemeinen auf der Grundlage von Basislinienauswertungen. Der wichtigste Auswerteschritt, die Bestimmung der ganzzahligen Doppeldifferenz-Phasenmehrdeutigkeiten, wird für Paare von Stationen durchgeführt. Gelingt dies, ist auch bei kurzer Meßdauer und bei Basislinienlängen bis einige Kilometer cm-Genauigkeit in den Lagekoordinaten erzielbar. Für Basislinien über 10 ... 20 km Länge, ist aber eine schnelle Mehrdeutigkeitsfestsetzung immer seltener durchführbar und die einfache Standardabweichung der Lagekoordinatenfehler übersteigt (auch bei erfolgreicher Mehrdeutigkeitslösung) vielfach die Grenze von 1 cm.

Diese räumliche Begrenztheit des Basislinienverfahrens kann bei der Positionierung in einem Netz von Referenzstationen überwunden werden. Dabei werden die GPS-Phasenbeobachtungen mehrerer das Meßgebiet umgebender Referenzstationen genutzt, um die entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler (ionosphärische und troposphärische Refraktion, Orbitfehler) mit höchster Genauigkeit zu modellieren. Weiterhin werden die stationsabhängigen Fehler, d.h. also insbesondere die Mehrwegeeffekte, sowohl der Code- wie auch der Phasenbeobachtungen verkleinert. Die Verringerung der Beobachtungsfehler führt zu einer Vereinfachung der Mehrdeutigkeitslösung und zu einer Verbesserung der Koordinatenergebnisse.

Fehlermodellierung und -verringern bei einer Positionierung im Referenzstationsnetz können implizit durch eine Netzausgleichung mit Zusatzparametern erfolgen. Zweckmäßiger ist es vielfach jedoch, eine Vorauswertung der Referenzstationsdaten durchzuführen und die Fehlermodelle explizit zu berechnen. Es besteht dann die Möglichkeit, für die Näherungsposition einer Mobilstation die Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation zu erzeugen und die Positionierung über die (kurze) Basislinie zur virtuellen Referenzstation hin vorzunehmen (Wanninger 1997).

---

<sup>1</sup> erschienen in Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN), **105**:113-118, Wichmann Verlag, Heidelberg, 1998.

## 2 Virtuelle Referenzstationen

Die Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation werden aus den Daten der real existierenden Referenzstationen berechnet. Sie sollen ähnliche oder bessere Fehlereigenschaften aufweisen als Beobachtungen, die mit einer realen Referenzstation auf derselben Position erzielt werden könnten.

Um die entfernungsabhängigen Fehlereinflüsse in der Basislinie zur Mobilstation möglichst gering zu halten, werden zur räumlichen Festlegung der virtuellen Referenzstation die Näherungskoodinaten der Mobilstation genutzt. Eine Genauigkeit von 100 m ist dafür mehr als ausreichend und durch absolute GPS-Positionierung jederzeit erzielbar.

Die Erzeugung der Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation erfolgt in zwei Stufen (Wanninger 1997). Im ersten Teil werden nach der Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstationsnetz aus deren Beobachtungen die Korrekturmodelle für entfernungs- und richtungsabhängige Fehler berechnet und die stationsabhängigen Fehler durch Zusammenführen der Beobachtungsdaten dieser Stationen verringert. Es

ergeben sich Beobachtungskorrekturen für die Code- und Trägerphasenmessungen in Bezug auf eine gewählte Position und Korrekturmodelle der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehler, die die Umrechnung der Beobachtungskorrekturen auf beliebige andere Positionen im Netzgebiet ermöglichen. In der zweiten Stufe können somit die gewonnenen Informationen genutzt werden, um die Beobachtungen der virtuellen Referenzstation zu erzeugen.

Die Berechnung der Beobachtungen einer virtuellen Referenzstation kann überall dort durchgeführt werden, wo die Informationen Näherungsposition des Nutzers, Beobachtungskorrekturen und Korrekturmodelle zusammenkommen. Soll sie in der Rechenzentrale des regionalen GPS-Netzes, also dort, wo die Beobachtungskorrekturen und Korrekturmodelle erzeugt werden, erfolgen, so muß der Nutzer seine Näherungsposition dorthin übermitteln. Andererseits kann der Nutzer die Berechnung einer virtuellen Station auch selbst vornehmen, wenn er Beobachtungskorrekturen und Korrekturmodelle übermittelt bekommt.

Die Positionierung der Mobilstation erfolgt über die **eine** kurze Basislinie zur virtuellen Referenzstation (Abb. 1), die weitgehend frei von entfernungsabhängigen Fehlereinflüssen ist. Das Koordinatenergebnis einer Positionierung mit einer virtuellen Station unterscheidet sich nicht von dem Ergebnis, welches mit einer Netzausgleichung erzielt werden kann, solange identische Fehlermodellierungsansätze Verwendung finden. Der Ansatz über eine virtuelle Station hat aber folgende Vorteile:

- **Geringerer Auswerteaufwand:** Die Mehrdeutigkeitslösung im Referenzstationsnetz und die Berechnung der Fehlermodelle und Beobachtungskorrekturen muß nur einmal erfolgen, unabhängig von der Anzahl der Nutzer.

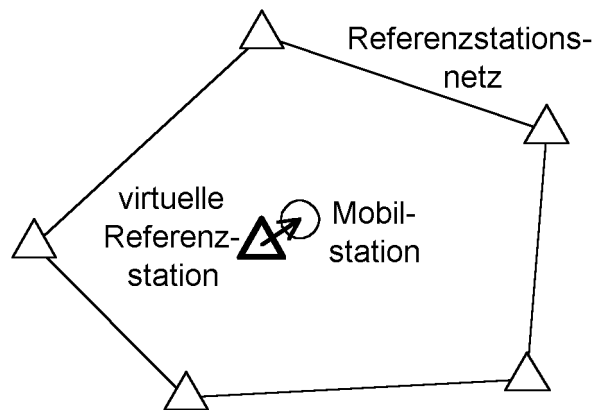


Abb. 1: Positionierung im Referenzstationsnetz mit Hilfe einer virtuellen Referenzstation.

- **Qualitätskontrolle:** Gleichzeitig mit der Auswertung des Netzes der realen Referenzstationen kann eine durchgreifende Qualitätskontrolle der Beobachtungsdaten vorgenommen werden, so daß der Nutzer nur kontrollierte Beobachtungen zur Verfügung gestellt bekommt.
- **Geringerer Kommunikationsaufwand:** Die Datenübertragung zum Nutzer beschränkt sich auf einen Satz von Beobachtungskorrekturen und die Korrekturmodelle und ist damit wesentlich geringer als bei einer Netzlösung, bei der die Daten aller Referenzstationen dem Nutzer übermittelt werden müssen.
- **Nutzung vorhandener Software:** Die Positionierung erfolgt über eine einzelne Basislinie, so daß existierende und weit verbreitete Softwarepakete dafür eingesetzt werden können.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde das RINEX-Datenformat (*Gurtner 1994*) gewählt, damit die Datenauswertung der Basislinie virtuelle Referenzstation - Mobilstation mit vorhandenen Postprocessing-Softwarepaketen durchgeführt werden konnte. Ebenso ist aber auch eine Echtzeit-Erzeugung der Beobachtungen der virtuellen Referenzstation denkbar. Sie stellt an die Kommunikationsverbindungen und an die Datenverarbeitung weitergehende Anforderungen.

### 3 Fehlereinflüsse und ihre Behandlung in Referenzstationsnetzen

Fast alle bei der relativen GPS-Positionierung relevanten Fehlereinflüsse können durch die Verwendung mehrerer die Mobilstation umgebender Referenzstationen verringert werden. Einzige Ausnahme stellen die Antennenphasenzentrumsfehler dar. Sie können nur durch Antennenkalibrierung und -korrektur vermindert werden.

Die wichtigsten entfernungs- und richtungsabhängig wirkenden Fehlereinflüsse sind die ionosphärische Refraktion, die troposphärische Refraktion und Orbitfehler. Wird die Mobilstation durch mindestens drei Referenzstationen umgeben, so erhält man basislinienbezogene

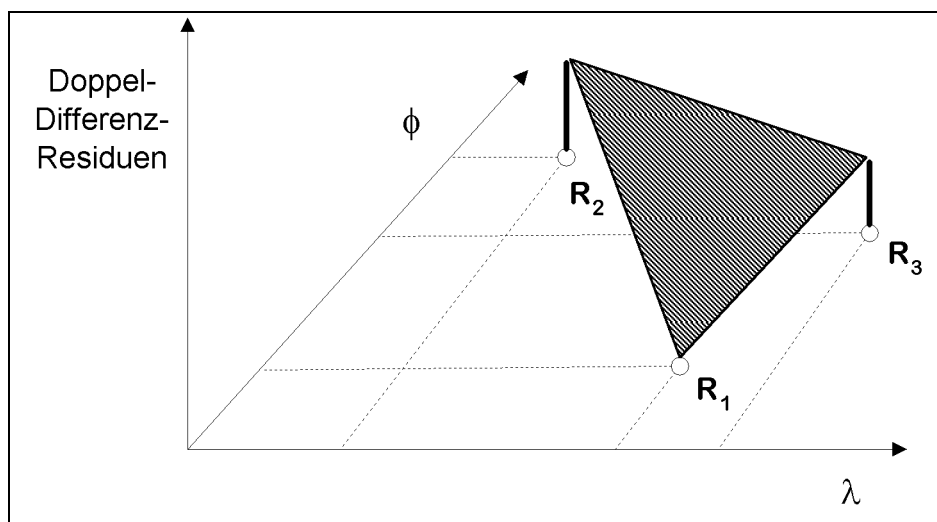


Abb. 2: Zweidimensionale lineare Interpolation von Beobachtungsfehlern bei Verwendung von drei Referenzstationen. Die Modellebene wird durch ihre Neigung in Nord-Süd- und in Ost-West-Richtung beschrieben.

Korrekturwerte für diese Fehlereinflüsse durch zweidimensionale lineare Interpolation (*Wanninger 1995, Wübbena u.a. 1996, Wanninger 1996*). Bei mehr als drei Referenzstationen werden die Korrekturmodellebenen durch Ausgleichung bestimmt. Aufgrund der besseren Anschaulichkeit erfolgt in Abbildung 2 die Darstellung des Modellierungsansatzes für Doppelte Differenzen, obwohl bei der verwendeten Realisierung die Berechnungen mit undifferenzierten Beobachtungen durchgeführt werden.

Die Modellkoeffizienten werden in jeder Meßepoche für jeden Satelliten und für jedes Signal ( $L_1$  und  $L_2$ , oder Linearkombinationen dieser Signale) berechnet. Wählt man als Signale die ionosphärische (geometrie-freie) und die ionosphären-freie Linearkombination, so werden die Fehler zum Teil nach ihren Ursachen getrennt: ionosphärisches Modell und geometrisches Modell, wobei letzteres troposphärische Restfehler (nach Anbringung eines troposphärischen Standardmodells) und Orbitfehler erfaßt. Eine Trennung von troposphärischen und Orbitfehlern ist mit diesem Ansatz nicht möglich, aber auch nicht notwendig. Die geometrischen Korrekturen gelten immer nur für die jeweils verwendeten Orbit-Datensätze und das gewählte Standardtroposphärenmodell. Beim Übergang auf Beobachtungen virtueller Referenzstationen entfallen diese Beschränkungen.

Die Korrekturmodelle beschreiben immer nur relative Fehlereinflüsse, d.h. sie beziehen sich nicht auf einen Punkt (absolute Koordinaten), sondern auf Basislinien (Koordinatendifferenzen). Die absoluten Einflüsse der genannten Fehler bleiben unberücksichtigt, da sie bei der relativen Positionierung keine Rolle spielen.

Auch die stationsabhängigen Fehlereinflüsse, die Mehrwegefehler und zufällige Fehler umfassen, werden in Referenzstationsnetzen verringert. Durch Bildung eines (gewichteten) Mittels über korrespondierende Messungen der verschiedenen Stationen vermindern sich diese Fehler sowohl bei den Code- wie auch bei den Phasenmessungen deutlich.

#### 4 Testdatensätze und -ergebnisse

Das Konzept der virtuellen Referenzstationen wurde mit Hilfe von Messungen im Referenzstationsnetz von Sachsen-Anhalt (*Patzschke und Leipholz 1996*) ausgetestet. In einer aus vier Referenzstationen bestehenden Netzschleife im Norden von Sachsen-Anhalt wurden an drei aufeinanderfolgenden Tagen (254-256/1996) mit vier Mobilempfängern für GPS-Messungen gut geeignete TPs in unterschiedlichen Entfernungen zu den Referenzstationen bestimmt. Auf jedem Punkt wurde 10 Stunden lang gemessen. Die Gesamtmenge der Beobachtungen wurde zur Berechnung von Sollösungen verwendet. Der eigentliche Test erfolgte mit 5 Minuten langen Teilstücken der Beobachtungen, also 120 Einzelbestimmungen für jeden Punkt. Somit konnten insgesamt 1440 Testberechnungen durchgeführt werden. Die Auswertung des Referenz-

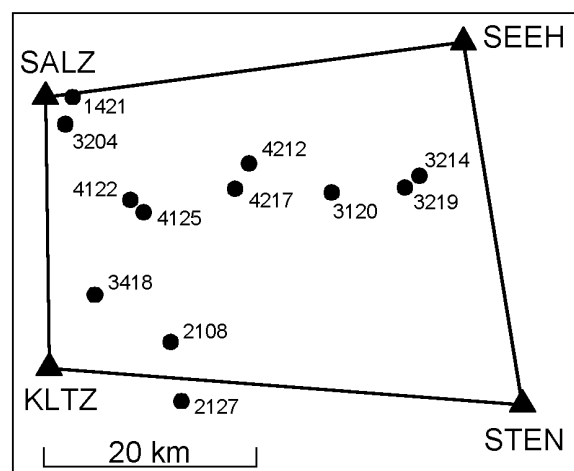


Abb. 3: Das Testgebiet im nördlichen Sachsen-Anhalt mit vier Referenzstationen und zwölf Mobilstationen.

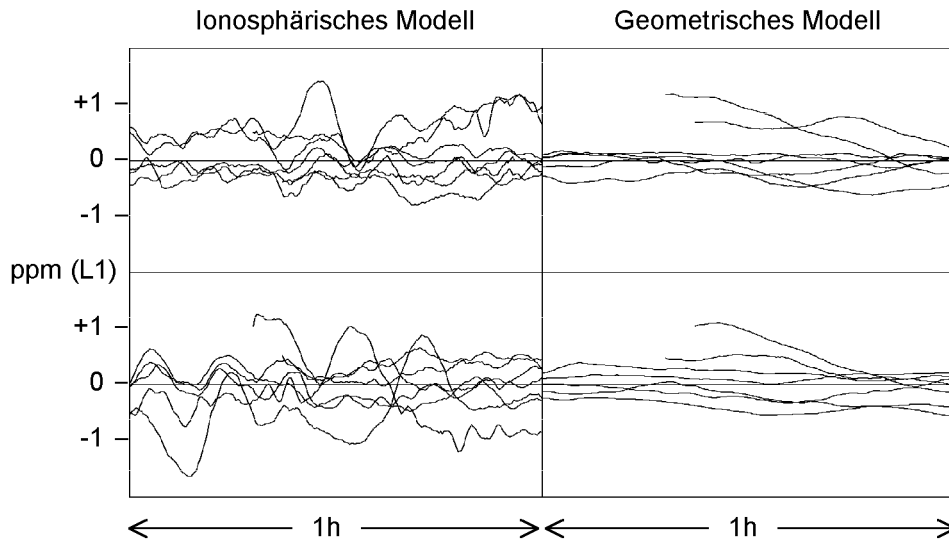


Abb. 4: Beispiele für Zeitreihen von Korrekturmodellen aus einer Stunde des Tages 255/96. Jede Kurve zeigt die Modellkoeffizienten eines Satelliten für die Nord-Süd-Richtung (oben) und für die Ost-West-Richtung (unten), für das ionosphärische Modell und für das geometrische Modell.

stationsnetzes (Mehrdeutigkeitslösung, Berechnung von Korrekturmodellen und Beobachtungskorrekturen) und auch die Erzeugung der Beobachtungen der virtuellen Referenzstationen erfolgte mit dem vom Erstautor entwickelten Wa-Soft-Programmsystem.

Die für jeden Tag erzeugten Modelle der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse lassen eine Einschätzung der wichtigsten Beobachtungsfehler zu. Abbildung 4 zeigt einen repräsentativen Ausschnitt von einer Stunde Dauer. Die ionosphärischen Modelle zeigen an allen drei Tagen keine Besonderheiten. Die Korrekturwerte übersteigen 1 ppm selten (bezogen auf  $L_1$ ). Die maximalen geometrischen Korrekturen, die die troposphärischen Fehler und Orbitfehler erfassen, liegen im allgemeinen deutlich unter 1 ppm. Sie weisen aber insbesondere am Tag 255/96 auch größere Werte bis zu 2 ppm auf, die auf troposphärische Störungen hindeuten.

Positionierungsergebnisse für die Mobilstationen wurden sowohl mit Wa-Soft wie auch mit den weit verbreiteten Programmen GPSurvey (Trimble Navigation Ltd.) und SKI (Leica AG) erzeugt. Bei den in den nächsten zwei Abschnitten vorgestellten Wa-Soft-Ergebnissen liegt der Schwerpunkt auf den erzielbaren Koordinatengenauigkeiten. Bei der Vorstellung der GPSurvey- und SKI-Resultate wird auch die Mehrdeutigkeitslösung betrachtet. Alle Ergebnisse beruhen auf der Auswertung statischer Messungen von jeweils 5 Minuten Dauer.

#### 4.1 Näherungslösung

Eine möglichst genaue Näherungslösung der Basislinienkoordinaten ist Voraussetzung für eine schnelle erfolgreiche Mehrdeutigkeitslösung. Näherungslösungen können sowohl aus Codemessungen wie auch aus Phasenmessungen („float“-Lösung) abgeleitet werden. Genauigkeitsvorteile ergeben sich bei der gemeinsamen Ausgleichung beider Beobachtungsarten. Bei kurzer Beobachtungsdauer wird dabei in den Lagekoordinaten mit den Codebeobachtungen in aller Regel eine höhere Genauigkeit erzielt als mit einer Trägerphasen-„float“-Lösung,

Code-Mehrwegeeinflüsse und -Rauschen [cm]	mp <sub>1</sub>	mp <sub>2</sub>
reale Referenzstationen	40	48
virtuelle Referenzstationen	26	32
Mobilstationen	32	47

Tab. 1: Code-Mehrwegeeinflüsse und -Rauschen aus Code-Trägerphasen-Vergleich berechnet, Standardabweichungen von Einzelmessungen für die erste (mp<sub>1</sub>) und die zweite (mp<sub>2</sub>) Frequenz.

bei der Höhenkoordinate ist es aufgrund der unterschiedlichen geometrischen Beziehungen umgekehrt.

Der Hauptfehlereinfluß auf die Codemessungen ergibt sich aus Mehrwegeeffekten und Meßrauschen. Die Summe beider Fehleranteile kann aus dem Vergleich mit Zweifrequenz-Phasenmessungen abgeschätzt werden (*Rocken u.a. 1994*). Für die Testdatensätze ergeben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Standardabweichungen für Einzelmessungen. Es ist zu erkennen, daß die Beobachtungen der Referenzstationen (auf Hausdächern) im Durchschnitt stärker beeinflußt sind als die der Mobilstationen (ausgewählte TPs mit recht hoher GPS-Punktqualität). Faßt man die vier Referenzstationen zu einer virtuellen Station zusammen, so ergibt sich eine deutliche Genauigkeitssteigerung (um 35 %) der Pseudostreckenmessungen. Diese Verbesserung spiegelt sich aber nur zum Teil in der differentiellen Code-Auswertung wider, da dort die Beobachtungen von virtueller Referenzstation und Mobilstation gemeinsam verarbeitet werden.

Auch die Trägerphasen-,float“-Lösung profitiert von der Verwendung mehrerer Referenzstationen, so daß sich in allen drei Koordinatenrichtungen eine Steigerung der Genauigkeit der Näherungslösungen beim Übergang von einer zur virtuellen Referenzstation von 20 bis 25 % ergibt (Tabelle 2).

## 4.2 Präzise Lösung

Die bei der Auswertung der insgesamt 1440 5-Minuten-Beobachtungsblöcken erzielten Koordinatengenauigkeiten sind in den Abbildungen 5 und 6 dargestellt. Für diese Untersuchung erfolgte die Mehrdeutigkeitslösung für die Gesamtdatenmenge eines Tages (10 Stunden), so daß keine Zweifel an der korrekten Festsetzung der Mehrdeutigkeiten bestehen. Jede Berechnung wurde sowohl für L<sub>1</sub> wie auch für die ionosphären-freie Linearkombination L<sub>0</sub> durchgeführt. Koordinatenberechnungen erfolgten zum einen über die Basislinie zur nächsten Referenzstation und zum anderen unter Verwendung der zugehörigen virtuellen Referenzstation. Abbildung 5 zeigt Standardabweichungen der Koordinatenfehler als Funktion der Entfernung zur nächsten Referenzstation. Regressionsgeraden verdeutlichen die Entfernungsabhängigkeit der erzielten Genauigkeiten.

Näherungslösung	Standardabweichung N/O/H [cm]
nächste Referenzstation	17/13/27
virtuelle Referenzstation	13/11/20

Tab. 2: Genauigkeit (einfache Standardabweichung) der Basislinien-Näherungslösungen bei jeweils 5 Minuten Beobachtungen aus kombinierter Code-Phasen-Auswertung in Nord/Ost/Höhe.

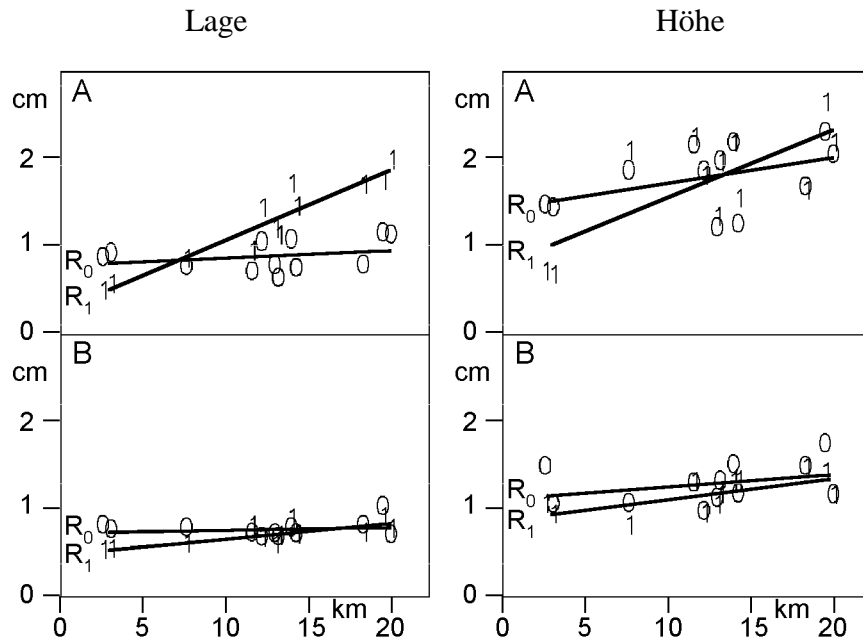


Abb. 5: Lage- (links) und Höhengenaugigkeit (rechts) in  $L_1$  (1) und  $L_0$  (0) bei Positionierung mit Hilfe einer Referenzstation (A) und mit Hilfe einer virtuellen Referenzstation (B), aufgetragen über die Entfernung zur nächsten Referenzstation. Jedes Symbol steht für die Standardabweichung aus 120 Beobachtungsböcken von je 5 Minuten Dauer. Die Regressionsgeraden sind entsprechend der verwendeten Signale mit  $R_1$  bzw.  $R_0$  bezeichnet.

Bei den Lagekoordinaten ergeben sich bei Auswertung mit Hilfe der nächsten Referenzstation für  $L_1$ -Lösungen bei kurzen Basislinienlängen Genauigkeitsvorteile gegenüber  $L_0$ -Lösungen. Über 8 km wird der Vorteil des geringeren Mehrwegeeinflusses und Meßrauschens aber durch den Nachteil der Wirkung der ionosphärischen Refraktion übertroffen. Die  $L_1$ -Lösungen zeigen eine entfernungsabhängige Genauigkeitsminderung von 0,8 ppm der Basislinienlänge, für  $L_0$  liegt sie bei 0,1 ppm. Hier wirken sich entfernungsabhängig wirkende Restfehler troposphärischer Refraktion und Orbitfehler aus.

Geht man auf die Verwendung von virtuellen Referenzstationen über, so kann das Genauigkeitsniveau insgesamt gesteigert werden und es liegt nun immer unter 1 cm. Bei  $L_0$  ist keine Entfernungsabhängigkeit der Genauigkeiten mehr nachweisbar. Bei  $L_1$  verbleiben entfernungsabhängige Restfehler von 0,2 ppm. Trotzdem liefert  $L_1$  bis in den Entfernungsbereich von 20 km höhere (oder zumindest gleichwertige) Lagegenauigkeiten als  $L_0$ . Bei Verwendung virtueller Referenzstationen in regionalen Netzen sollte also grundsätzlich das  $L_1$ -Signal zur Koordinatenberechnung verwendet werden. Ausnahmen können sich aber bei ionosphärischen Störungen ergeben (Wanninger 1997). Bestehen aufgrund der ionosphärischen Situation Zweifel an der hohen Qualität der ionosphärischen Modellierung, ist eine  $L_0$ -Lösung zu bevorzugen.

Bei der Höhenbestimmung spielt die ionosphärische Refraktion eine geringere Rolle. So ist die  $L_1$ -Lösung bei Verwendung der nächsten Referenzstation der  $L_0$ -Lösung bis über 10 km Basislinienlänge hinaus überlegen und erzielt auch bei 20 km Entfernung kaum schlechtere Ergebnisse. Verwendet man virtuelle Referenzstationen, so kann das Genauigkeitsniveau insgesamt gesteigert werden. Es ergeben sich aber weiterhin entfernungsabhängige Abnahmen der Genauigkeiten von 0,1 ppm ( $L_0$ ) bzw. 0,2 ppm ( $L_1$ ), wobei aber  $L_1$  immer bessere Ergeb-

nisse liefert als  $L_0$ . Die verbleibenden entfernungsabhängig wirkenden Restfehler sind insbesondere auf die Troposphäre zurückzuführen. Bei den beiden Mobilstationen, die weniger als 5 km von der nächsten Referenzstation entfernt liegen, wurden mit  $L_1$  schlechtere Ergebnisse bei Verwendung der virtuellen Referenzstation erzielt als bei Verwendung der nahe gelegenen realen Referenzstation. Auch hier ist zu vermuten, daß sich unvollständig modellierte troposphärische Restfehler auswirken. Trotzdem konnten bei der Positionierung im Referenzstationsnetz mit Hilfe virtueller Stationen die Genauigkeiten auf besser als 1,5 cm gesteigert werden.

Die Ergebnisse werden in Abbildung 6 zusammengefaßt und für das Gebiet der Netzschleife verallgemeinert. Beim Übergang von der Positionierung mit einer Referenzstation auf die Verwendung einer virtuellen Station im Referenzstationsnetz können sowohl die entfernungsabhängigen Fehleranteile deutlich gesenkt (aber für  $L_1$  und in der Höhe nicht vollständig beseitigt) werden, wie auch das entfernungsunabhängige Genauigkeitsniveau verringert werden.  $L_1$ -Lösungen liefern dann im allgemeinen die genaueren Koordinaten. Lagegenauigkeiten von besser als 1 cm und Höhengenaugigkeiten von besser als 1,5 cm konnten mit einer Meßdauer von 5 Minuten in der gesamten Netzschleife auf für GPS-Messungen gut geeigneten Punkten erzielt werden.

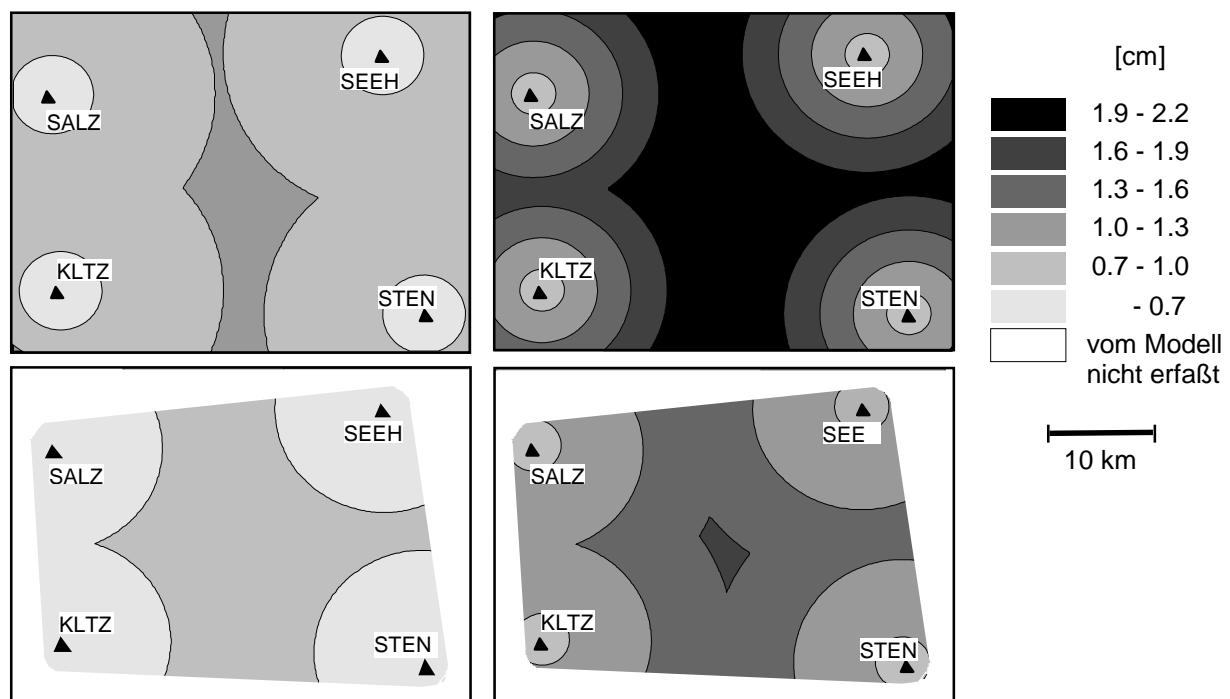


Abb. 6: Verallgemeinerung der Resultate auf die gesamte Netzschleife: erzielbare Genauigkeiten (einfache Standardabweichung) für die Lage (links) und Höhe (rechts), unter Verwendung der jeweils nächsten Referenzstation (oben, bis 10 km Entfernung  $L_1$ -, darüberhinaus  $L_0$ -Koordinatenlösungen) und der zugehörigen virtuellen Referenzstation (unten,  $L_1$ -Lösungen).

### 4.3 Auswertungen mit GPSurvey und SKI

Von etlichen auf dem Markt befindlichen GPS-Auswerteprogrammen weisen GPSurvey und SKI mit die höchsten Erfolgsquoten bei der Mehrdeutigkeitslösung auf (Wanninger u.a. 1997). Mit GPSurvey 2.20 und SKI 2.2 wurden sowohl die Basislinien zur jeweils nächsten Referenzstation, wie auch die Basislinien virtuelle Referenzstation - Mobilstation bearbeitet.



Als korrekte Lösungen wurden diejenigen Lösungen betrachtet, für die das Programm die Mehrdeutigkeiten festsetzen konnte und deren Koordinatenfehler die Testgrenzen von 4 cm in der Lage und 8 cm in der Höhe nicht überstiegen. Übertrafen die Koordinatenfehler eine der Testgrenzen, wurde von einer falschen Mehrdeutigkeitslösung ausgegangen und das Ergebnis als unzuverlässig eingestuft.

Aus der Berechnung aller 1440 Beobachtungsblöcke ergaben sich Mittelwerte für die Korrektheit und die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitslösungen (Tab. 3a,b). GPSurvey 2.20 erzielte unter beiden Aspekten hervorragende Ergebnisse. Selbst der Übergang auf die Positionierung im Referenzstationsnetz mit Hilfe virtueller Referenzstationen konnte die Resultate nicht mehr verbessern. Dagegen profitierte SKI 2.2 vom Übergang auf die Positionierung mit virtuellen Referenzstationen. Die Anzahl korrekter Lösungen konnte auf 94,4 % gesteigert werden. Auch bei SKI ist die Zuverlässigkeit der Mehrdeutigkeitsfestsetzung bei allen Lösungen so hoch, daß eine weitere Verbesserung kaum denkbar ist.

Von den von den Softwarepaketen erzielten Koordinatengenauigkeiten sind in Tabelle 4 die wichtigsten Eckwerte für 3 km lange bzw. 20 km lange Basislinien zusammengestellt. Bei Verwendung der nächsten Referenzstation wurde bei kurzen Basislinien eine Einfrequenz-Lösung erzeugt und bei langen Basislinien  $L_0$ -Lösungen. Bei Verwendung der virtuellen Station wurden grundsätzlich Einfrequenz-Lösungen verwendet.

Die GPSurvey-Koordinatenergebnisse konnten nicht ganz das Wa-Soft-Genauigkeitsniveau erreichen. Wie nähere Untersuchungen zeigten, stimmen die Koordinatenergebnisse aber überein, wenn die Wa-Soft-Ergebnisse mit gleichgewichteten Beobachtungen berechnet werden. Die höhere Wa-Soft-Genauigkeit ist also auf die dort verwendete elevationsabhängige Gewichtung der Beobachtungen zurückzuführen. Die SKI 2.2-Ergebnisse weichen davon aus zwei Gründen ab:

- Insbesondere bei Nutzung der nächsten Referenzstation wurden weniger Lösungen erzielt. Geht man davon aus, daß die Mehrdeutigkeitsfestsetzung gerade bei Datensätzen mit großen Beobachtungsfehlern erschwert ist, werden wohl gerade die 5-Minuten-Blöcke mit größeren Koordinatenfehlern hier ausgeschlossen sein. Es kann also erwartet werden, daß die Ergebnisse eher zu positiv ausgefallen sind.
- Die Standardlösung bei SKI 2.2 ist eine kombinierte  $L_1/L_2$ -Lösung ohne Ionosphärenkorrektur. Trotz der Verwendung von mehr Beobachtungen fällt dieser Lösungstyp schlechter als eine reine  $L_1$ -Lösung aus, da die  $L_2$ -Phasenbeobachtungen von deutlich geringerer Qualität sind.

GPSurvey 2.20	Korrektheit in %	Zuverlässigkeit in %	SKI 2.2	Korrektheit in %	Zuverlässigkeit in %
nächste Referenzstation	99.9	99.9	nächste Referenzstation	88.1	99.8
virtuelle Referenzstation	99.9	99.9	virtuelle Referenzstation	94.4	99.9

Tab. 3a,b: Mehrdeutigkeitslösung mit GPSurvey 2.20 und SKI 2.2 für 1440 5-Minuten-Beobachtungsblöcke.

Koordinatengenauigkeit [cm]		Wa-Soft	GPSurvey 2.20	SKI 2.2
nächste Referenzstation	Lage	0,5 ... 1,0	0,6 ... 1,2	1,0 ... 1,2
	Höhe	0,7 ... 2,0	0,8 ... 2,3	0,7 ... 2,1
virtuelle Referenzstation	Lage	0,5 ... 0,8	0,6 ... 0,8	0,9 ... 1,0
	Höhe	0,9 ... 1,4	1,1 ... 1,5	1,1 ... 1,5

Tab. 4: Koordinatengenauigkeiten in Lage und Höhe bei Abständen zur nächstgelegenen Referenzstation von 3 km ... 20 km.

Trotzdem kann für alle vorgestellten Ergebnisse die Schlußfolgerung gezogen werden, daß in dieser Netzschleife auf für GPS-Messungen gut geeigneten Punkten mit 5 Minuten Beobachtungen Lagegenauigkeiten von mindestens 1,0 cm und Höhengenaugigkeiten von mindestens 1,5 cm erzielt werden konnten.

## 5 Schlußfolgerungen

Beim Konzept der virtuellen Referenzstationen werden die für eine Mobilstation optimalen Beobachtungen einer Referenzstation aus den Beobachtungen der realen Referenzstationen eines regionalen GPS-Netzes berechnet. Die Positionierung der Mobilstation erfolgt dann über eine kurze Basislinie und kann mit vorhandenen Softwarepaketen durchgeführt werden. Die Modellierung der entfernungs- und richtungsabhängigen Fehlereinflüsse im regionalen Referenzstationsnetz und die gleichzeitige Verringerung der Mehrweegeinflüsse auf der Referenzstationsseite führen dabei zu einer deutlichen Verringerung der Beobachtungsfehler und damit zu einer verbesserten Mehrdeutigkeitslösung und geringeren Koordinatenfehlern.

In einer Netzschleife von vier Stationen in Sachsen-Anhalt wurden auf 12 für GPS-Messungen gut geeigneten TPs jeweils 10 Stunden Beobachtungen gesammelt. Durch die Auswertung von 5-Minuten-Beobachtungsblöcken konnte die Verbesserung der Mehrdeutigkeitslösung und die Verringerung der Koordinatenfehler nachgewiesen werden. Es ergaben sich bei der Auswertung mit unterschiedlichen Programmsystemen erzielbare Lagegenauigkeiten von 1,0 cm und Höhengenaugigkeiten von 1,5 cm im gesamten Einzugsgebiet der Netzschleife bei Verwendung virtueller Referenzstationen.

**Dank** Die für diese Untersuchung verwendeten GPS-Beobachtungsdaten wurden vom Landesamt für Landesvermessung und Datenverarbeitung in Halle zur Verfügung gestellt bzw. in Zusammenarbeit mit dem Landesamt erzeugt.

## 6 Literatur

- GURTNER, W. (1994): RINEX: The Receiver Independent Exchange Format, GPS World, Juli 1994, 48-52.
- PATZSCHKE, S., LEIPHOLZ, T. (1996): GPS-Referenzstationen im Land Sachsen-Anhalt, Zeitschrift für das Öffentliche Vermessungswesen des Landes Sachsen-Anhalt (LSA Verm) 2/96, 140-155.
- ROCKEN, C., JOHNSON, J., BRAUN, J., MEERTENS, C., PERRY, S. (1994): UNAVCO Facility GPS Receiver Tests, University NAVSTAR Consortium (UNAVCO), Boulder, Colo..
- WANNINGER, L. (1995): Improved Ambiguity Resolution by Regional Differential Modeling of the Ionosphere, Proceedings of ION GPS '95, Palm Springs, 55-62.
- WANNINGER, L. (1996): Fehlermodellierung in regionalen Referenzstationsnetzen, 41. DVW-Fortbildungsseminar: GPS-Anwendungen und Ergebnisse '96, Potsdam, DVW-Schriftenreihe 28/97, 206-218.
- WANNINGER, L. , ALBERT, A., WORM, W. (1997): Schnelle statische Positionierung mit GPS - ein Softwarevergleich, Zeitschrift für Vermessungswesen, 122:308-313.
- WANNINGER., L. (1997): Virtuelle Referenzstationen in regionalen GPS-Netzen, 46. DVW-Fortbildungsseminar: GPS-Praxis und -Trends '97, Frankfurt am Main, DVW-Schriftenreihe, im Druck.
- WÜBBENA, G. , BAGGE, A., SEEBER, G., BÖDER, V., HANKEMEIER, P. (1996): Reducing Distance Dependent Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks, Proceedings of ION GPS '96, Kansas City, 1845-1852.

Anschrift der Verfasser:

Dr.-Ing. Lambert Wanninger  
Dipl.-Ing. Jens Böhme  
Geodätisches Institut  
TU Dresden  
D-01062 Dresden