

Erweiterung des stochastischen Modells von GNSS-Beobachtungen unter Verwendung der Signalqualität

Xiaoguang Luo, Michael Mayer und Bernhard Heck

Zusammenfassung

In vielen GNSS-Auswerteprogrammen wird ein vereinfachtes Modell zur Gewichtung der Beobachtungen verwendet, das unter der Annahme azimuthaler Isotropie lediglich von der Satellitenelevation abhängt und für zenitale (horizontnahe) Beobachtungen maximale (minimale) Gewichte liefert. Für ungestörte GNSS-Signale ist dieses Gewichtsmodell auf Grund einer häufig bestehenden hohen Korrelation zwischen Signalqualität und Satellitenelevation zweckmäßig und anwendbar. Unter einer nicht-idealen Beobachtungssituation, beispielsweise auf Grund von Mehrwegebelastung oder Signalbeugung, kann eine – für hochpräzise geodätische Aufgaben erforderliche – realitätsnahe Gewichtung der Beobachtungen mit einem elevationsabhängigen Modell nicht mehr gewährleistet werden. In diesem Artikel wird ein verbessertes, auf Verhältnissen von Signal- und Rauschleistung basierendes Gewichtsmodell vorgestellt. Die Auswirkungen auf GNSS-Auswertungen werden anhand eines regionalen GNSS-Netzes untersucht.

Summary

In many GNSS software products a simplified observation weighting model is used which is merely based on satellite elevation angle and obtained under the assumption of azimuthal symmetry. This elevation-dependent weighting model provides maximum (minimum) weight for observations at zenith (near horizon) and is often suitable for undisturbed GNSS signals due to the existing strong correlation between signal quality and satellite elevation angle. However, this geometry-related weighting model is not appropriate for high-precision geodetic applications if observations are included which are affected for example by multipath effects or by signal diffraction under non-ideal observation conditions. In this paper an improved weighting model which is based on signal-to-noise power ratio measurements is presented and its effects on GNSS data processing are illustrated using data of a regional GNSS network.

1 Einleitung

Seit der Einführung der Satellitenpositionierungstechnik erfährt die Positionsbestimmung mittels globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) eine fortwährende Leistungssteigerung sowohl in der Satelliten- und Empfängertechnologie als auch im Bereich der Auswertemodelle. Die am häufigsten in GNSS-Auswerteprogrammen verwendeten Auswerteverfahren basieren auf der Methode der kleinsten Quadrate. Dieser Ansatz liefert jedoch nur dann zuverlässige Schätzwerte für die unbekannten Para-

meter und deren Genauigkeiten, wenn sowohl das funktionale als auch das stochastische Modell im Rahmen der GNSS-Auswertung vollständig und korrekt gewählt werden. Während die funktionale Modellbildung seit Beginn der operationellen Phase des globalen Positionierungssystems GPS intensiv untersucht und stetig verbessert wurde, ist das stochastische Modell von GNSS-Beobachtungen nahezu unverändert geblieben. Die Unzulänglichkeit bzw. Unvollständigkeit der stochastischen Modellbildung ist zum einen auf die unrealistische Gewichtung der Beobachtungen und zum anderen auf die Vernachlässigung von Korrelationen zwischen den Beobachtungen zurückzuführen. Diese Korrelationen lassen sich in mathematische und physikalische Korrelationen unterteilen, wobei die physikalischen Korrelationen weiter in räumliche und zeitliche Korrelationen untergegliedert werden können. Im Gegensatz zu mathematischen Korrelationen, die beispielsweise durch die Bildung abgeleiteter Beobachtungen (Einfach-, Doppeldifferenzen) entstehen und relativ einfach im Auswerteprozess berücksichtigt werden können, sind physikalische Korrelationen nur schwer modellierbar, da diese auf sehr vielfältige Weise entstehen können und deren Berücksichtigung numerisch stabile und effiziente Verfahren erfordert (Kim und Langley 2001). Seit längerer Zeit ist bekannt, dass die von GNSS-Auswerteprogrammen gelieferten Genauigkeitsangaben auf Grund der Unvollständigkeit der stochastischen Modellierung zu optimistisch sind (Ananga et al. 1994, Han und Rizos 1995, Tiberius und Kenselaar 2000).

Die Gewichtung der Beobachtungen stellt einen wichtigen Aspekt der stochastischen Modellbildung bei GNSS-Auswertungen dar. Da die einzelnen Beobachtungen beispielsweise auf Grund von satelliten- bzw. stationsspezifischen Einflussfaktoren sowie durch atmosphärische Effekte eine unterschiedliche Qualität aufweisen, sollte dies im Auswerteprozess berücksichtigt werden. Des Weiteren haben Untersuchungen in Luo et al. (2007a) aufgezeigt, dass die Beobachtungsgewichtung im Vergleich zu den anderen auf die GNSS-Auswertung einwirkenden Einflussfaktoren wie z.B. Basislinienlänge, Mehrwegeeffekte, neutrosphärische Modellierung und Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung eine dominierende Rolle spielen kann.

In den letzten zehn Jahren haben sich verschiedene Forschungsarbeiten mit der Gewichtung von GNSS-Beobachtungen zur Verbesserung der stochastischen Modellbildung mit unterschiedlicher Zielsetzung und unter Anwendung spezifischer Modellansätze befasst. Basierend auf einer Exponentialfunktion und empirisch bestimmten Parametern entwickelten Euler und Goad (1991)

das erste elevationsabhängige Modell zur Gewichtung der GNSS-Beobachtungen. Jin und de Jong (1996) verwenden dieses Gewichtsmodell für Code- und Phasenbeobachtungen. Han (1997) untersuchte die Effekte des elevationsabhängigen Gewichtsmodells auf die Parameterschätzung und stellte dabei signifikante Verbesserungen im Rahmen der Phasenmehrdeutigkeitslösung fest. Des Weiteren entwickelten Hartinger und Brunner (1999) unter Anwendung des Verhältnisses von Signal- und Rauschleistung (SNR) das SIGMA- ϵ -Modell mit dem Ziel, horizontnahe, durch die Atmosphäre und Mehrwegeeffekte stärker gestörte Beobachtungen im Rahmen der Parameterschätzung zur Verbesserung der geometrischen Konfiguration berücksichtigen zu können. Basierend auf dem SIGMA- ϵ -Modell führten Brunner et al. (1999), Wieser und Brunner (2000) und Wieser (2001) das erweiterte SIGMA- Δ -Modell ein, das die Einflüsse der Signalbeugungseffekte auf die undifferenzierten Beobachtungen automatisch detektieren und reduzieren kann. Alle oben genannten Modifikationen des stochastischen Modells von GNSS-Beobachtungen führen zu signifikanten Verbesserungen bei der Schätzung der unbekannten Parameter und deren Genauigkeiten (Barnes et al. 1998, Wang et al. 1998, Howind 2005).

Im Folgenden wird ein weiteres SNR-basiertes Gewichtsmodell und dessen experimentelle Implementierung in die Bernese GPS Software 5.0 (Dach et al. 2007) im Rahmen einer Fallstudie vorgestellt. Anhand der Ergebnisse der differenziellen, im Postprocessing-Modus durchgeführten Auswertungen von langzeit-statischen Beobachtungen ausgewählter Basislinien des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes werden die Einflüsse des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten, die geschätzten stationspezifischen Neutrosphärenparameter und die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten untersucht.

2 Das elevationsabhängige Gewichtsmodell

Bei GNSS wird die Pseudo-Entfernung zwischen den Satelliten und dem Empfänger mit Hilfe von elektromagnetischen Wellen gemessen. Dabei ist der Messunsicherheit umso kleiner, je stärker das empfangene Signal und je schwächer das bei der Messung unvermeidbare thermische Rauschen ist. Nach Butsch und Kipka (2004) ist die von einem GNSS-Empfänger ermittelte Signalstärke unter anderem abhängig von

- Antennengewinn (Richtwirkung der Antenne) der Sendeanenne des Satelliten in Richtung des GNSS-Empfängers,
- Antennengewinn der Empfangsantenne des GNSS-Empfängers in Richtung des Satelliten,
- Entfernung zwischen Satellit und Empfänger sowie
- Dämpfung der Signale durch Absorption in der Atmosphäre.

Diese Faktoren führen dazu, dass die Stärke des empfangenen Signals in der Regel mit steigendem Elevationswinkel des Satelliten zunimmt. Deshalb wird die Elevation e vielfach als Indikator für die Qualität von GNSS-Beobachtungen verwendet, und das elevationsabhängige Gewichtsmodell $p = \sin^2 e$ ist häufig in GNSS-Auswerteprogrammen implementiert.

Dieses indirekt auf die Signalqualität bezogene Gewichtsmodell ist lediglich für Beobachtungen geeignet, die unter idealen Beobachtungsbedingungen kaum oder nur geringfügig von Mehrwege- und Signalbeugungseffekten bzw. azimutalen Anisotropien der Atmosphäre beeinflusst sind, weil bei qualitativ hochwertigen, ungestörten Signalen die Signalqualität mit der Satellitenelevation hoch korreliert ist. Das elevationsabhängige Gewichtsmodell weicht umso mehr von der Realität ab, je größer die Störung und je stärker das Rauschen der empfangenen Signale ist.

Des Weiteren ist das elevationsabhängige Gewichtsmodell bei identischem a-priori Varianzfaktor nicht in der Lage, eine frequenzabhängige Gewichtung für die Beobachtungen auf unterschiedlichen Trägerfrequenzen (z.B. L1, L2) durchzuführen, da ein Beobachtungspaar zweier Frequenzen bezogen auf dieselbe Station denselben Elevationswinkel aufweist. Eine frequenzabhängige Gewichtung ist jedoch unter anderem deshalb sinnvoll, weil die Charakteristik der Empfangsantenne und die Signalverarbeitungstechnik des Empfängers die Qualität der registrierten Signale stark beeinflussen können. Ergänzende Informationen über die Abhängigkeit der Signalqualität von den verwendeten Empfängern sind z.B. Wanninger et al. (2000) zu entnehmen. Begründet im Antennendesign und in der Empfangscharakteristik kann sich somit die Signalqualität auf L1 und L2 unterscheiden. Zur Visualisierung dieser Unterschiede werden die erfassten Qualitätsmaße der Signale der Station Ravensburg (RAVE) des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes beispielhaft veranschaulicht. In Abhängigkeit von der Satellitenelevation stellt Abb. 1 einleitend die entsprechenden Verhältnisse von Signal-zu-Rauschleistungsdichte, SNR_0 -Werte, auf L1 und L2 in der Einheit Dezibel Hertz [dBHz] dar. In Abschnitt 3.1 wird die Kenngröße SNR_0 detailliert erläutert. Die treppenförmige Struktur der visualisierten SNR_0 -Werte ist auf die SAPOS®-interne Datenverarbeitung zurückzuführen, bei der eine Reduzierung der vom Empfänger gelieferten höher aufgelösten Signalqualitätsmaße auf ganzzahlige SNR_0 -Werte stattfindet. Im Vergleich zu L1 weisen die SNR_0 -Werte auf L2 ein höheres Grundniveau (L1: 32 dBHz, L2: 36 dBHz) und eine engere Bandbreite der Beobachtungsqualität auf. Ab einem Elevationswinkel von ca. 50° bleiben die SNR_0 -Werte auf L2 konstant auf dem lokalen Maximum, während im gleichen Elevationsbereich auf L1 eine Schwankung innerhalb von ca. 6 dBHz der SNR_0 -Werte zu beobachten ist.

Da das rein elevationsabhängige azimutinvariante Gewichtsmodell lediglich auf der geometrischen Konfigura-

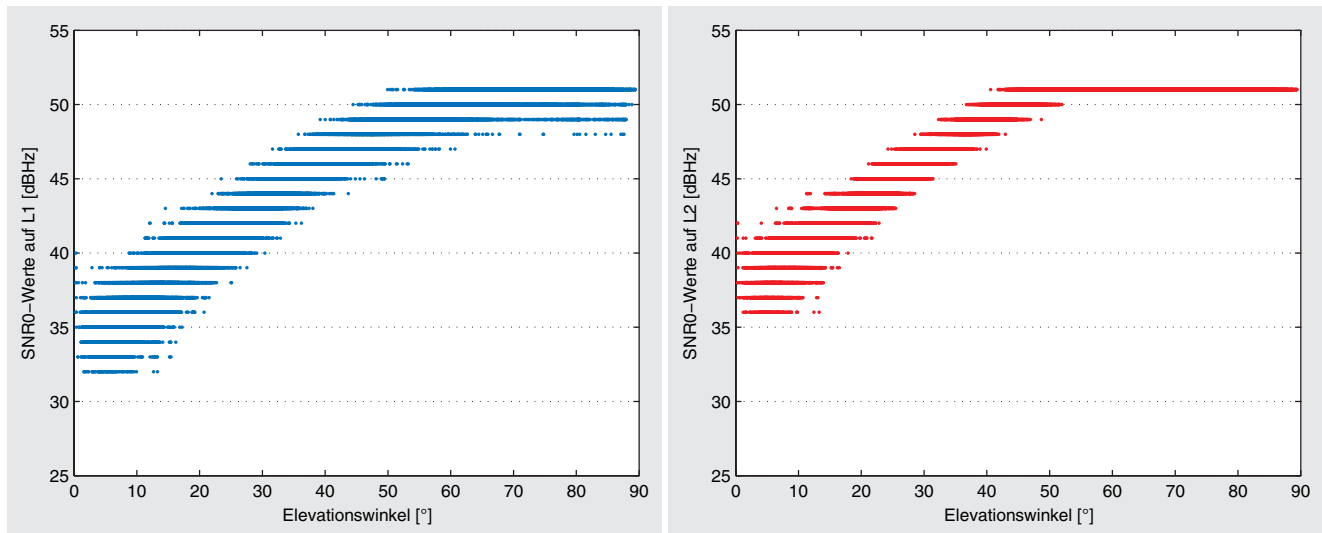


Abb. 1: Vergleich der Signalqualität auf L1 und L2, Station RAVE (Leica SR 520, LEIAT503), DOY2004: 186; links: SNR0-Werte für L1, rechts: SNR0-Werte für L2

tion zwischen Beobachtungsstation und Satellit basiert, führt dieser Ansatz oft zu einer starken Herabgewichtung von Beobachtungen in niedrigen Elevationen, so dass deren Einflüsse auf die Auswertergebnisse sehr gering sind. Bei Satellitenkonfigurationen, bei denen Signale niedrig stehender Satelliten zur Stabilisierung der Parameterschätzung unerlässlich sind, kann eine realistische Gewichtung dieser Beobachtungen Abhilfe schaffen.

Basierend auf den oben genannten Unzulänglichkeiten des elevationsabhängigen Gewichtsmodells soll ein realitätsnahes und praktikables Gewichtsmodell für langzeitstatische GNSS-Beobachtungen die im Folgenden aufgeführten Eigenschaften aufweisen:

- Der Qualitätsindikator für die Beobachtungen soll sich direkt auf die zeitgleich mit der Phasenbeobachtung registrierten Signalqualitätsmaße beziehen.
- Das Gewichtsmodell soll in der Lage sein, die Beobachtungsgewichtung für unterschiedliche Trägerfrequenzen (z.B. L1 und L2) getrennt durchzuführen.
- Eine allzu starke Herabgewichtung von Beobachtungen niedriger Elevationsbereiche soll möglichst vermieden werden.

3 Das SNR-basierte Gewichtsmodell

Neben den Code- und Phasenmessungen registrieren moderne geodätische GNSS-Empfänger das sogenannte Verhältnis von Signal-zu-Rauschleistung (engl.: signal-to-noise power ratio), das die Qualität von GNSS-Signalen charakterisiert. In den meisten GNSS-Applikationen dient dieser Parameter als Kriterium für die Leistungsfähigkeit eines Empfängers zur Verfolgung der Satellitensignale und stellt eine Möglichkeit zum Vergleich der Signalstärke zwischen unterschiedlichen Kanälen und Satelliten dar. Dieses Qualitätsmaß wird je nach Empfängertyp und Hersteller auf unterschiedliche Weise angegeben.

3.1 Maße zur Quantifizierung der Signalqualität und deren Konvertierungen

In der Signaltheorie wird die Stärke eines Signals üblicherweise durch seine Amplitude A (in der Einheit Volt) oder seine Leistung S (in der Einheit Watt) angegeben. Bei modulierten Signalen unterscheidet man zwischen der Leistung des unmodulierten Trägers C und der Leistung des modulierten Signals S . Bei GNSS bezieht sich die Leistung C in der Regel auf die Empfangsantenne, während die Leistung S auf den Ausgang des Korrelators bezogen ist. Wenn die Leistung des Signals auf denselben Referenzpunkt bezogen wird, ist S normalerweise auf Grund der Filterung des modulierten Signals nur unwesentlich geringer als C .

Der größte Anteil der im GNSS-Empfänger auftretenden thermischen Rauschleistung N ist in der Wärmestrahlung von Umgebungsobjekten im relevanten Frequenzbereich begründet. Ein weiterer Teil der Rauschleistung entsteht in der Antenne bzw. im Empfänger selbst. Detaillierte Informationen zum Themenkomplex des Systemrauschens von GNSS-Empfängern sind z.B. Langley (1997) zu entnehmen. Da die Rauschleistung zwischen Antenne und Korrelator näherungsweise um denselben Faktor wie das Nutzsignal verstärkt wird, unterscheiden sich die Quotienten aus Trägerleistung C_{Ant} und Rauschleistung N_{Ant} an der Antenne und aus Signalleistung S_{Korr} und Rauschleistung N_{Korr} am Korrelatorausgang nur geringfügig. Deshalb sind Werte für das Verhältnis von Träger-zu-Rauschleistung C/N und das Verhältnis Signal-zu-Rauschleistung S/N praktisch austauschbar und werden synonym verwendet:

$$C/N = \frac{C_{Ant}}{N_{Ant}} \approx \frac{S_{Korr}}{N_{Korr}} = S/N = SNR = \left(\frac{A_{Signal}}{A_{Noise}} \right)^2. \quad (1)$$

Da im Falle von GNSS die Signalleistung S um mehrere Größenordnungen größer als die Rauschleistung N ist,

wird SNR in der Regel logarithmisch in der Pseudoeinheit Dezibel [dB] angegeben:

$$SNR \text{ [dB]} = 10 \cdot \log_{10} (S/N) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{A_{\text{Signal}}}{A_{\text{Noise}}} \right). \quad (2)$$

Des Weiteren kann die Rauschleistung allgemein als Produkt aus Rauschleistungsdichte N_0 (engl.: noise power density) und Schleifenbandbreite B_L (engl.: loop bandwidth [Hz]) durch

$$N = N_0 \cdot B_L \quad (3)$$

ausgedrückt werden. B_L wird durch die Empfängersoftware während der Signalakquisition oder während schneller Bewegungsänderungen des Empfängers variiert. Da das SNR mit variabler Schleifenbandbreite ebenfalls variieren würde, ist es üblich, das SNR auf eine B_L zu normieren. Für das SNR in [dB] und das auf die Schleifenbandbreite B_L normierte Verhältnis von Signal-zu-Rauschleistungsdichte SNR_0 in [dBHz] gilt nach Butsch und Kipka (2004):

$$S/N_0 = SNR_0 \text{ [dBHz]} = 10 \cdot \log_{10} (S/N) \text{ [dB]} + B_L \text{ [dBHz]}. \quad (4)$$

Zur Quantifizierung der Signalqualität geben die meisten modernen GNSS-Empfänger Schätzwerte für SNR in [dB] oder SNR_0 in [dBHz] an. Manche Empfänger liefern herstellerabhängige Werte AMU (engl.: Arbitrary Manufacturer Units). Unter Anwendung modell- und herstellerspezifischer Umrechnungsformeln lassen sich diese AMU -Werte in SNR bzw. in SNR_0 konvertieren. Für Trimble 4000SSI Empfänger beispielweise erfolgt die frequenzabhängige Konvertierung von AMU in SNR gemäß (Landau 2007):

$$\begin{aligned} SNR_1 \text{ [dB]} &= 10 \cdot \log_{10} (230 \cdot AMU_1^2) \\ SNR_2 \text{ [dB]} &= 10 \cdot \log_{10} (50 \cdot (AMU_2 - 5)^2). \end{aligned} \quad (5)$$

Zur Konvertierung von AMU in SNR_0 gilt (Trimble 1999):

$$SNR_{0,1,2} \text{ [dBHz]} = 30 + 10 \cdot \log_{10} (AMU_{1,2}^2) - 3. \quad (6)$$

Die umgerechneten SNR - bzw. SNR_0 -Werte sind dabei als Näherung zu betrachten, da die wahren Werte z.B. bei SNR_0 um bis zu 3 [dBHz] davon abweichen können (Butsch und Kipka 2004).

3.2 Realisierung des SNR-basierten Gewichtsmodells

Das Thema der Beobachtungsgewichtung unter Verwendung von SNR wurde zum ersten Mal von Talbot (1988) behandelt. Basierend auf dem in Langley (1997) entwickelten funktionalen Modell lässt sich die Varianz der undifferenzierten GNSS-Phasenbeobachtungen $\sigma_{L_i}^2$ [mm²]

in Abhängigkeit von der Schleifenbandbreite B_L [Hz], der Wellenlänge des Trägers λ [m] und dem gemessenen Verhältnis von Träger-zu-Rauschleistungsdichte C/N_0 [dBHz] mit

$$\sigma_{L_i}^2 = B_L \cdot \underbrace{\left(\frac{\lambda_i}{2\pi} \right)^2}_{K_i} \cdot 10^{-\left(\frac{C_i/N_0}{10} \right)} \quad (7)$$

direkt darstellen, wobei der Index i die Frequenz des Trägers indiziert. Gleichung (1) analysierend kann C/N_0 in Gleichung (7) durch S/N_0 bzw. SNR_0 ersetzt werden. In Hartinger und Brunner (1999) wurde der Vorfaktor K_i basierend auf der Gesamtheit der Datenbasis mit Hilfe der Varianz von Doppeldifferenzresiduen bestimmt. Anschließend können Varianzen der Doppeldifferenzen mit einer verbesserten Gewichtung der einzelnen Beobachtungen mittels Varianzfortpflanzung erhalten werden.

Im Gegensatz zum oben beschriebenen Varianzmodell ist der in dieser Fallstudie realisierte Modellansatz unabhängig von Gleichung (7) und basiert auf einer umfangreichen Datenbasis der gemessenen SNR -Werte. Somit wird der Einfluss örtlicher Gegebenheiten auf GNSS-Signale umfassend berücksichtigt. Dieses SNR -basierte Gewichtsmodell wird in zwei Schritten realisiert und ist in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Im ersten Schritt werden die AMU - bzw. SNR_0 -Werte aus RINEX-Dateien extrahiert, die mit dem Programm TEQC (Estey und Meertens 1999) aus den binären Rohdaten ermittelt werden können. Auf Grund der Herstellerabhängigkeit werden die AMU -Werte anschließend unter Anwendung von herstellerspezifischen Umrechnungsformeln auf ein vergleichbares Niveau in SNR_0 [dBHz] konvertiert. Im zweiten Schritt werden für jede vorhandene Antennen-Receiver-Kombination minimale und maximale SNR_0 -Werte – sowohl für L1 als auch für L2 – innerhalb des gesamten bearbeiteten Projekts gesucht; somit erfolgt dieses Vorgehen im Postprocessing-Modus innerhalb des kompletten Netzes und über die gesamte Beobachtungszeit. Danach werden die Gewichtswerte (WGT) für die einzelnen Beobachtungen beider Frequenzen durch ein auf den entsprechenden minimalen Wert bezogenes Verhältnis zwischen dem aktuellen und dem entsprechenden maximalen SNR_0 -Wert erhalten. Anschließend können die Gewichtswerte für L1- und L2-Beobachtungen einer bestimmten Antennen-Receiver-Kombination mittels des empirisch bestimmten Ansatzes

$$W_{L1/2}^i = f(SNR_{0,L1/2}^i) = \left(\frac{SNR_{0,L1/2}^i - SNR_{0,L1/2}^{MIN}}{SNR_{0,L1/2}^{MAX} - SNR_{0,L1/2}^{MIN}} \right)^2 \quad (8)$$

berechnet werden. Diese frequenzabhängigen Gewichtswerte können nach Bildung von Linearkombinationen und Doppeldifferenzen zur Besetzung der Varianz-Kovarianz-Matrix (COV) der abgeleiteten Beobachtungen mittels Varianzfortpflanzung verwendet werden. Dieser Modellansatz ist im Rahmen dieser Fallstudie in die Ber-

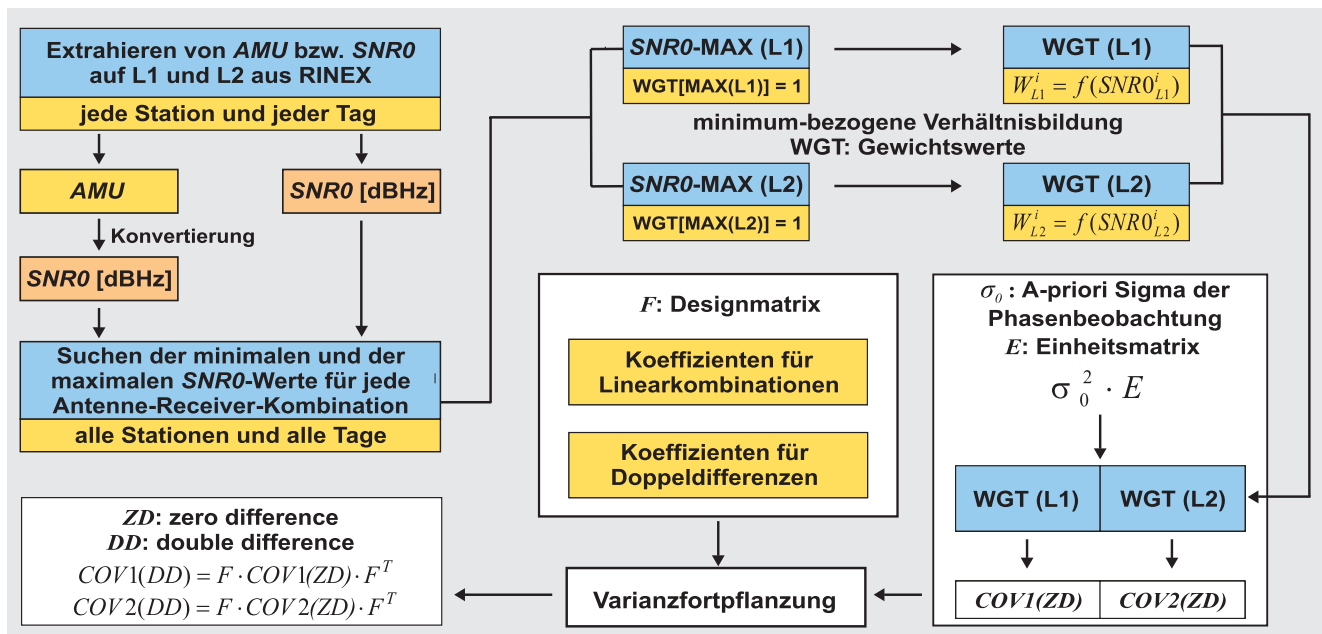


Abb. 2: Schematische Darstellung der Realisierung des SNR-basierten Gewichtsmodells und dessen Beitrags zur stochastischen Modellierung in der Bernese GPS Software 5.0

nese GPS Software 5.0 (BS5) implementiert worden. Die Vorverarbeitungsschritte, z. B. Suchen nach den extremen SNR0-Werten und Berechnung der Gewichtswerte, wurden in MATLAB durchgeführt.

Im Gegensatz zu dem elevationsabhängigen und den auf Gleichung (7) basierenden Gewichtsmodellen, die auf einem funktionalen Zusammenhang beruhen, benötigt das in dieser Arbeit realisierte SNR-basierte Gewichtsmodell eine ausreichende Datengrundlage, um die Repräsentativität der ermittelten ausrüstungsspezifischen minimalen bzw. maximalen SNR0-Werte zu gewährleisten. Deshalb ist dieser Ansatz für langzeit-statische geodätische Anwendungen entwickelt worden. Die Anwendung dieses Ansatzes bei kinematischen und kurzzeit-statischen Applikationen ist in der vorliegenden Realisierung nicht vorgesehen.

In Abb. 3 sind die erhaltenen Gewichtswerte für L1- und L2-Beobachtungen den Ergebnissen des elevationsabhängigen Gewichtsmodells für die Station Ravensburg (RAVE) vergleichend gegenüber gestellt. Die Unterschiede der berechneten Gewichtswerte auf L1 und L2 sind ab einem Elevationswinkel von ca. 30° deutlich zu erkennen. Unter Anwendung des elevationsabhängigen Gewichtsmodells ist eine Herabgewichtung der Beobachtungen über die ganze Elevationsbandbreite festzustellen, wobei diese Herabgewichtung sich für L2 signifikanter als für L1 zeigt. Des Weiteren ist erkennbar, dass die rein auf der geometrischen Konfiguration basierende, elevationsabhängige Gewichtung nicht in der Lage ist, die Qualitätsstreuung der Beobachtungen zu berücksichtigen, da die SNR-basierten Gewichtswerte eine größere Bandbreite der Beobachtungsqualität aufweisen.

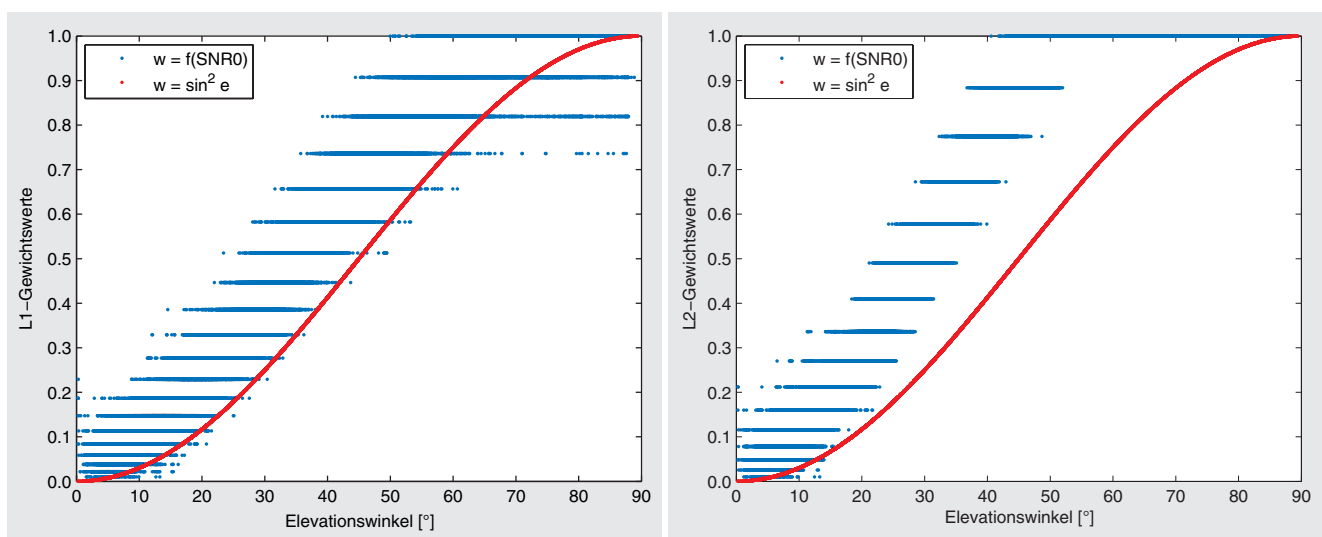


Abb. 3: Vergleich der Gewichtswerte unter Anwendung verschiedener Gewichtsmodelle, Station RAVE (Leica SR 520, LEIAT503), DOY2004: 186; links: L1, rechts: L2

Tab. 1: Vergleich des elevationsabhängigen Gewichtsmodells mit dem SNR-basierten Gewichtsmodell

Aspekte	Elevationsabhängiges Modell	SNR-basiertes Modell
Grundprinzip der Modellierung	Abhängigkeit zwischen Elevation und Signalqualität (indirekt)	Signalqualität (direkt)
Anwendungsgebiete	Kinematische, kurzzeit- bzw. langzeit-statische Anwendungen	Langzeit-statische Anwendungen
Realitätsnähe	Gering, beeinflusst durch stations-spezifische Faktoren, Satelliten-geometrie und Empfangscharakteristik	Hoch, realistische Gewichtung der einzelnen Beobachtungen
Getrennte Gewichtung für L1 und L2	Nicht möglich auf Grund desselben Elevationswinkels	Möglich durch separate Registrierung der SNR-Werte
Herabgewichtung der Beobachtungen	In niedrigen und mittleren Elevationsbereichen	Reduziert durch den direkten Bezug auf die Signalqualität
Komplexität der Modellierung	Einfaches funktionales Modell mit geringem Rechenaufwand	Komplexe Modellierung mit hohem Rechenaufwand

Bei diesem Vergleich ist insbesondere auf gute Qualität der ausgewählten Stationen und ruhige Wettersituation geachtet worden, um die Einflüsse zusätzlicher Faktoren möglichst gering zu halten. In Tab. 1 werden die beiden Gewichtsmodelle hinsichtlich des Modellierungsprinzips, der Anwendungsgebiete sowie deren Vor- und Nachteile gegenüber gestellt.

4 Auswirkungen des SNR-basierten Gewichtsmodells auf GNSS-Auswertungen

Im Folgenden werden die Einflüsse des in dieser Arbeit entwickelten SNR-basierten Gewichtsmodells auf GNSS-Auswertungen unter den Aspekten

- Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten,
- Beeinflussung der stationsspezifischen Neutrosphärenparameter und
- Reproduzierbarkeit der ermittelten Stationskoordinaten untersucht. Für die GNSS-Auswertung stehen jeweils kontinuierlich erfasste (24 Stunden), statische GPS-Beobachtungen des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes zur Verfügung, wobei die durchschnittliche Länge der ausgewählten Basislinien für die folgenden Untersu-

chungen mehr als 100 km beträgt. Ausgewählte wichtige Charakteristika der Datenprozessierung zur Bestimmung der Tageslösung sind in Tab. 2 zusammengefasst.

4.1 Einflüsse auf die Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten

Zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten wird die sogenannte SIGMA-Strategie der BS5 zunächst auf die Widelane-Linearkombination (L5) und dann auf die ionosphärenfreie Linearkombination (L3) angewandt, wobei im zweiten Schritt (L3-Lösung) die zuvor bestimmten L5-Phasenmehrdeutigkeiten eingeführt werden. Detaillierte Informationen bezüglich der SIGMA-Strategie zur Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten sind z.B. Dach et al. (2007) zu entnehmen.

Zur Veranschaulichung der Einflüsse des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Phasenmehrdeutigkeitenlösung wird die Basislinie SISC zwischen den Stationen Sigma-ringen (SIGM) und Schwäbisch Hall (SCHA) des SAPOS®-Netzes als Beispiel genommen. Die Länge dieser Basislinie beträgt ca. 120 km. Bei der Phasenmehrdeutigkeitenlösung mit L3 wird die Station SIGM festgehalten. In Abb. 4 sind

die prozentualen Angaben der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten bei unterschiedlichen minimalen Elevationswinkeln (10° bzw. 3°) vergleichend dargestellt.

Auf Grund der Senkung des minimalen Elevationswinkels von 10° auf 3° nimmt die durchschnittliche Anzahl

Tab. 2: Parametereinstellungen der Datenprozessierung zur Bestimmung der Tageslösung

Parameter	Charakteristik
Beobachtungsgröße	GPS-Phasenbeobachtung; Doppeldifferenz
Abtastintervall	15 Sekunden
Beobachtungsgewichtung	$\sin^2 e$, $f(\text{SNR0})$
Minimale Elevation	3°, 10°
Orbits und Erdrotationsparameter	IGS-Produkte (Final)
Neutrosphärisches Prädiktionsmodell	Modell-Niell (dry)
Abbildungsfunktion (mapping function)	Niell _{wet} (Niell 1996)
Gültigkeit neutrosphärischer Zusatzparameter	2 Stunden
Phasenmehrdeutigkeitenlösung	SIGMA-Strategie (L5, L3)
Antennenkorrektur	Individuelle absolute Kalibrierwerte

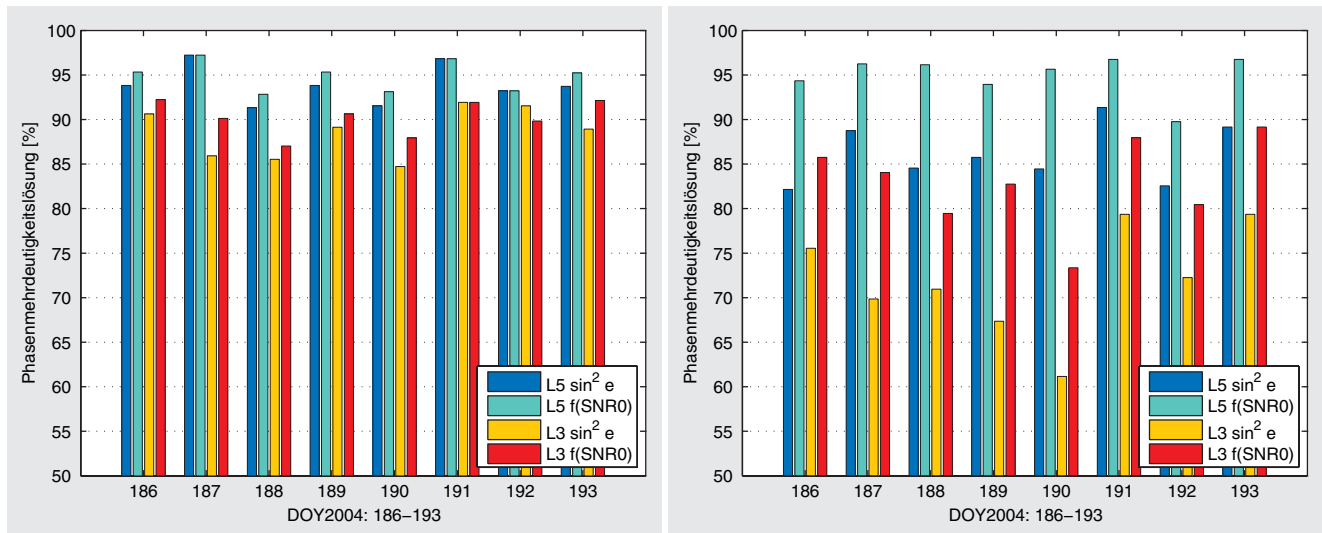


Abb. 4: Vergleich der Phasenmehrdeutigkeitslösung auf L5 und L3, Basislinie: SISC (119.4 km), Leica SR 520, LEIAT503, DOY2004: 186–193; links: minimale Elevation: 10°, rechts: minimale Elevation: 3°

der zu lösenden Phasenmehrdeutigkeiten um ca. 53 % von 64 auf 98 stark zu. Begründet ist dies in der großen Anzahl von Signalabrissen in niedrigen Elevationsbereichen, wodurch neue Phasenmehrdeutigkeiten eingeführt werden müssen. Bei einem minimalen Elevationswinkel von 10° zeigt das SNR-basierte Gewichtsmodell nur schwach signifikante Auswirkungen auf die Phasenmehrdeutigkeitslösung, während bei einem minimalen Elevationswinkel von 3° eine deutliche Verbesserung der prozentualen Anzahl der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten – bis zu mehr als 10% sowohl auf L5 als auch auf L3 – unter Anwendung des SNR-basierten Gewichtsmodells erzielt werden kann. Die Anzahl der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten ist abhängig davon, wie gut die im Rahmen der GNSS-Auswertung verwendeten funktionalen und stochastischen Modellansätze die Realität beschreiben können. Die Gültigkeit dieser Modelle kann somit von anderen Einflussfaktoren (z. B. der Wettersituation) zusätzlich beeinträchtigt werden. Dies ist in Abb. 4 an der Phasenmehrdeutigkeitslösung von GPS-Tag 190 deutlich zu erkennen. Auf Grund von erheblichen Niederschlagsmengen an diesem Tag in verschiedenen Teilen des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes (Wetterzentrale 2007) sind große Unterschiede hinsichtlich der Einsetzbarkeit der untersuchten Beobachtungsgewichtungen sichtbar.

4.2 Einflüsse auf stationsspezifische Neutrosphärenparameter

Die Neutrosphäre subsummiert die Tropo-, die Strato- und Teile der Mesosphäre. Sie erstreckt sich vom Erdboden bis in eine Höhe von etwa 80 km und ist elektrisch neutral. Die Neutrosphäre wirkt auf GNSS-Signale durch die Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Laufzeitverzögerung), der Ausbreitungsrichtung sowie der Signalstärke ein; dabei stellt die variable Laufzeitverzögerung

den dominierenden Einflussfaktor dar. Detaillierte Informationen zum Einfluss der Neutrosphäre sind beispielsweise in Spilker (1996) zu finden. Des Weiteren können die Neutrosphäreinflüsse nach Hopfield (1969) in eine trockene und eine komplementäre feuchte Komponente zerlegt werden. Die trockene Komponente beträgt etwa 90 % der gesamten neutrosphärischen Laufzeitverzögerung. Die feuchte Komponente kann zur Erzeugung von hochauflösenden Wasserdampffeldern verwendet werden (Luo et al. 2007c). Bei GNSS-Auswertungen mit der BS5 können die neutrosphärischen Einflüsse durch Schätzung von sogenannten stationsspezifischen Neutrosphärenparametern erweitert modelliert werden, um zeit- und ortsabhängigen atmosphärischen Einflüssen Rechnung zu tragen, die durch das verwendete Prädiktionsmodell (Tab. 2) nicht erfasst werden können. Allerdings sind die Genauigkeiten der geschätzten Neutrosphärenparameter von mehreren Faktoren in unterschiedlichem Ausmaß abhängig, wie Untersuchungen von Luo et al. (2007b) für das Untersuchungsgebiet zeigen.

Zur Veranschaulichung der Einflüsse des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Schätzung der Neutrosphärenparameter werden die Basislinien SISC zwischen Sigmaringen (SIGM) und Schwäbisch Hall (SCHA) sowie die Basislinie OFHE zwischen Offenburg (OFFE) und Heidelberg (HEID) aus dem SAPOS®-Netz als Beispiele ausgewählt, wobei die Stationen SIGM und OFFE bei der Parameterschätzung mit L3 festgehalten wurden. Diese beiden Basislinien weisen eine ähnliche Länge und Ausrichtung (Nord-Süd-Richtung) auf und unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der Mehrwegeeffekte. Nach Mayer et al. (2004) werden die Stationen OFFE und HEID besonders stark von Mehrwegeeffekten beeinflusst, während die Stationen SIGM und SCHA eine sehr geringe Mehrwegebelastung aufweisen. In Abb. 5 sind die mittels verschiedener Gewichtsmodelle geschätzten Neutrosphärenparameter sowie deren Standardabweichungen

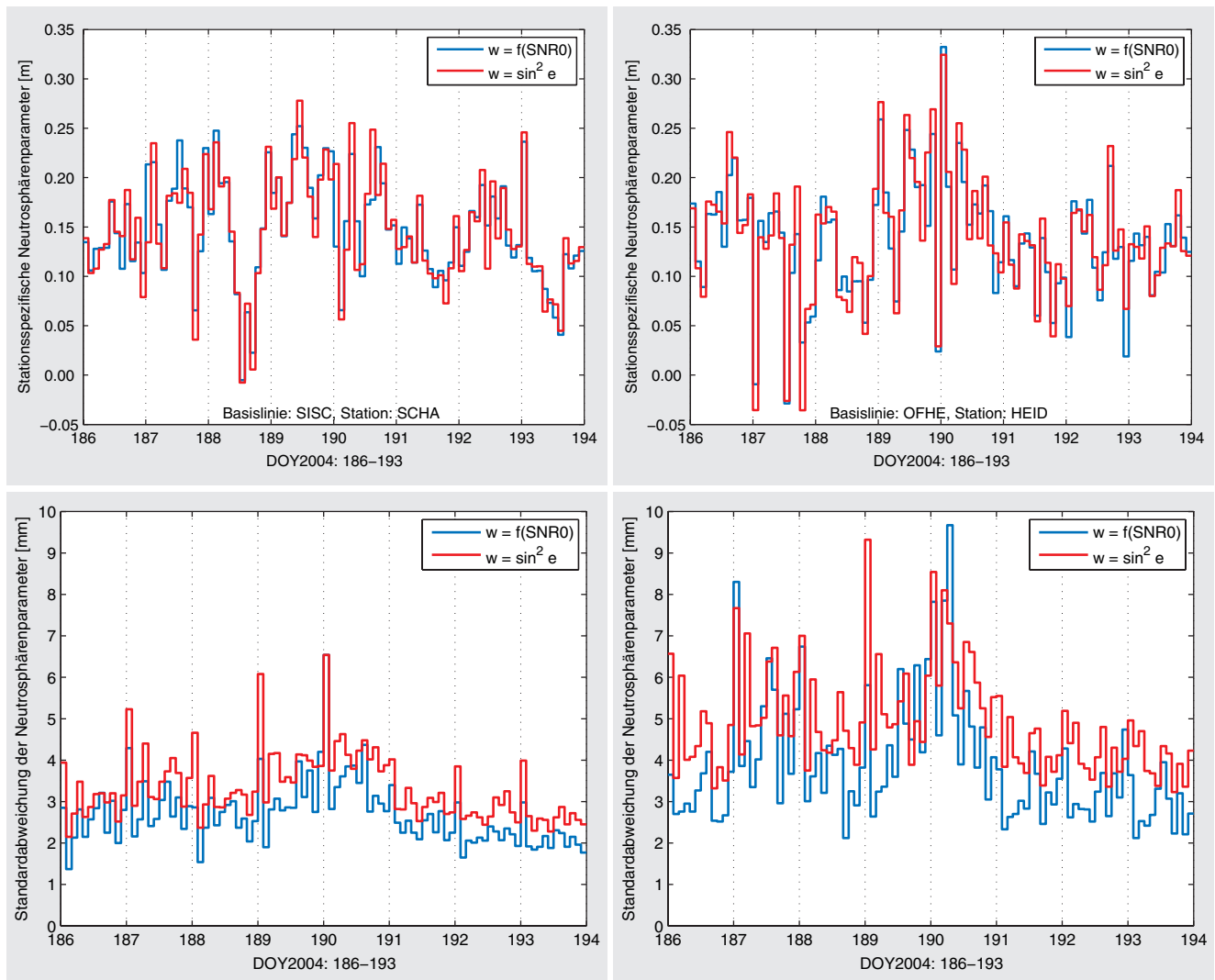


Abb. 5: Einflüsse des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Neutrosphärenparameter; oben: geschätzte Neutrosphärenparameter [m], unten: Standardabweichung der Neutrosphärenparameter [mm], links: SISC (119.4 km), rechts: OFHE (114.8 km), Leica SR 520, LEIAT503, DOY2004: 186–193, minimale Elevation: 3°

mit einer zeitlichen Gültigkeit von zwei Stunden für die Stationen SCHA und HEID dargestellt.

Die geschätzten Neutrosphärenparameter, die unter Anwendung verschiedener Gewichtsmodelle ermittelt wurden, unterscheiden sich im Durchschnitt um ca. 1.5 cm. Bezogen auf das mittlere Niveau der geschätzten Neutrosphärenparameter, das in diesem Fall bei ca. 15 cm liegt, beträgt dieser Unterschied ca. 10%. Werden die Standardabweichungen der geschätzten Parameter auf ähnliche Weise betrachtet, ist eine Reduktion um ca. 20% (25%) bei der Basislinie SISC (OFHE) unter Anwendung des SNR-basierten Gewichtsmodells zu erzielen. Diese Verbesserung ist umso deutlicher, je stärker eine Basislinie von Mehrwegeeffekten beeinflusst wird. Werden die unteren beiden Grafiken von Abb. 5 miteinander verglichen, zeigen sich deutlich die Einflüsse der Mehrwegeeffekte auf die Standardabweichungen der geschätzten Neutrosphärenparameter.

4.3 Einflüsse auf die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten

Basierend auf den festgestellten positiven Auswirkungen des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Parameterschätzung stellt sich die Frage, ob eine Steigerung der Reproduzierbarkeit bzw. der inneren Genauigkeit der ermittelten Stationskoordinaten mittels einer verbesserten Gewichtung der GNSS-Beobachtungen bei langzeit-statischen Anwendungen für große Basislinienlänge zu erzielen ist. Als Beispiel stellt Abb. 6 die Koordinateninkremente der Höhenkomponente für die Station Schwäbisch Hall (SCHA) nach einer Basislinienlösung (Basislinie SISC: SIGM-SCHA) in einem lokalen topozentrischen Koordinatensystem dar. Die Station SIGM wurde bei der Auswertung festgehalten.

Wird zunächst Abb. 6 mit der linken oberen Grafik von Abb. 5 verglichen, ist eine hohe Korrelation zwischen der Höhenkomponente und den Neutrosphärenparametern deutlich zu erkennen. Das SNR-basierte Gewichtsmodell führt jedoch zu keiner signifikanten Verbesserung

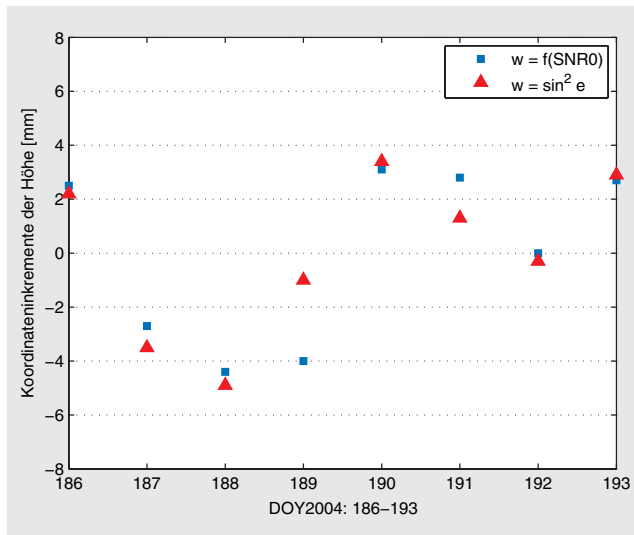


Abb. 6: Vergleich der Koordinateninkremente der Höhenkomponente hinsichtlich der verwendeten Gewichtsmodelle, Station SCHA, Basislinie: SISC (119.4 km), Leica SR 520, LEIAT503, DOY2004: 186–193, minimale Elevation: 3°

der Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten, wobei die Unterschiede der Koordinateninkremente in den Lagekomponenten (Norden und Osten) deutlich kleiner als die der Höhenkomponente sind. Dieses Resultat lässt sich jedoch einfach begründen: Den Aussagen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten liegen Auswertungsergebnisse zu Grunde, die mit SAPOS®-Daten tagesweise ermittelt wurden. Als permanent operierende Referenzstationen weisen die SAPOS®-Stationen hinsichtlich Mehrwege- und Signalbeugungseffekten im Durchschnitt eine gute Stationsqualität auf. Auf der Basis einer Datengrundlage mit guter Qualität ist es schwierig, die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten lediglich mittels einer realistischen Gewichtung deutlich zu verbessern. Des Weiteren hängt die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten unter anderem von der Modellierung der neutrosphärischen Einflüsse im Rahmen der GNSS-Auswertung ab. Dieser Aspekt ist besonders zu beachten, da zum einen die Neutrosphäreneinflüsse auf Grund der langen Basislinie (größer als 100 km) nicht durch differenzielle Auswertetechniken eliminiert werden können und zum anderen mit abnehmendem minimalen Elevationswinkel die Anzahl der stark von der Neutrosphäre beeinflussten Beobachtungen im Rahmen der GNSS-Auswertung des SAPOS®-Netzes zunimmt. Außerdem verschlechtert sich die Leistungsfähigkeit des in der GNSS-Auswertung verwendeten Neutrosphärenmodells (z.B. Saastamoinen-Modell (Saastamoinen 1973) und Niell-Abbildungsfunktion) mit abnehmender Elevation, siehe hierzu Davis und Herring (1984). Darüber hinaus ist der schwache Einfluss des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten auf die Verwendung der Langzeitbeobachtungsdaten (hier 24 Stunden) zurückzuführen. Unter optimalen Beobachtungsbedingungen gilt: Je länger die Beobachtungszeit

ist, desto geringer sind die Einflüsse ungünstiger Satellitengeometrie und umso geringere Veränderungen der geschätzten Parameter sind zu erwarten. Neben der algorithmusbedingten Anforderung an die Datenmenge besteht eine weitere wichtige Motivation für Langzeitbeobachtungsdaten darin, die Einflüsse des SNR-basierten Gewichtsmodells auf die Schätzung der Neutrosphärenparameter festzustellen.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In der präsentierten Arbeit wurde die Realisierung eines alternativen SNR-basierten Gewichtsmodells zur Erweiterung des stochastischen Modells von GNSS-Beobachtungen vorgestellt und dessen Einfluss auf die GNSS-Auswertungen unter drei Aspekten (Phasenmehrdeutigkeitslösung, Neutrosphärenparameter, Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten) mit ausgewählten Beispielen aus dem baden-württembergischen SAPOS®-Netz untersucht und veranschaulicht. Im Vergleich zu anderen auf SNR-Werten basierenden Gewichtsmodellen (z.B. Hartinger und Brunner 1999) ist dieses SNR-basierte Gewichtsmodell unabhängig von dem in Langley (1997) beschriebenen funktionalen Zusammenhang (Gleichung (7)) und basiert auf einer ausrüstungsspezifischen Normierung der gemessenen SNR-Werte. Dieses Gewichtsmodell wurde im Rahmen dieser Fallstudie in die Bernese GPS Software 5.0 implementiert und erlaubt eine frequenzabhängige Gewichtung jeder in die Auswertung eingehenden Beobachtung. Die erhaltenen Gewichtswerte können zur Besetzung der Kovarianzmatrix von Doppeldifferenzen mittels Varianzfortpflanzung verwendet werden. Für eine Vergleichsstudie mit dem konventionellen elevationsabhängigen Gewichtsmodell wurden lange Basislinien (Länge größer als 100 km) mit langer Beobachtungszeit (24 Stunden) unter Einbeziehung der Beobachtungen in niedrigen Elevationen (minimale Elevation 3°) verarbeitet.

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass unter Verwendung der verbesserten SNR-basierten Beobachtungsgewichtung die Anzahl der gelösten Phasenmehrdeutigkeiten (SIGMA-Strategie) bei einer minimalen Elevation von 3° um mehr als 10% sowohl auf L5 als auch auf L3 gesteigert werden kann. Des Weiteren ist unter Anwendung des SNR-basierten Gewichtsmodells eine Reduzierung der Standardabweichungen der geschätzten stationsspezifischen Neutrosphärenparameter um bis zu 25% zu erzielen. Allerdings wird die Reproduzierbarkeit der Stationskoordinaten auf Grund der guten Qualität der Datenbasis, der langen Beobachtungszeit sowie möglicherweise der Unzulänglichkeiten des verwendeten Neutrosphärenmodells nicht signifikant verbessert.

Im Vergleich zur elevationsabhängigen Gewichtung ist das in dieser Arbeit entwickelte SNR-basierte Gewichtsmodell zwar realistischer, aber dessen Implementierung ist zeitaufwändig und die Anwendung sehr rechenintensiv. Außerdem benötigt dieses Modell eine ausreichende

Datengrundlage, um bei der Gewichtsbi- dung die Repräsentativität der extremen SNR-Werte zu gewährleisten. Auf Grund dieser Anforderung an die Datenbasis ist dieses SNR-basierte Gewichtsmodell lediglich für langzeit-statische Anwendungen geeignet. Des Weiteren ist dieses Modell in der aktuellen Realisierung sehr sensitiv gegenüber Ausreißern bei den erfassten SNR-Werten. Extrem große bzw. sehr kleine SNR-Werte führen zu einer Verschiebung des Gesamtniveaus der Gewichtswerte für die GNSS-Beobachtungen.

Die Stabilität dieses SNR-basierten Gewichtsmodells ist durch weitere GNSS-Auswertungen mit verschiedenen Datenbasen unter den Aspekten Instrumentarium und Datenqualität zu verifizieren. Neben 24-Stunden-Prozessierungen sind Auswertungen mit kürzerem Zeitfenster (z. B. zwei Stunden) geplant. Darüber hinaus soll eine Vergleichsstudie mit dem Ansatz von Hartinger und Brunner (1999) für langzeit-statische Beobachtungen erfolgen. Außerdem müssen neben einer realistischen Gewichtung der GNSS-Beobachtungen künftig auch zeitliche und räumliche Korrelationen zwischen den Beobachtungen berücksichtigt werden, um das stochastische Modell der GNSS-Auswertung zu vervollständigen.

Dank

Die Autoren danken dem Referat 31 des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg für die Bereitstellung der GNSS-Daten sowie der Antennenkalibrierwerte. Dank gebührt einem anonymen Reviewer für wichtige Anmerkungen. Der erste Autor dankt darüber hinaus der Landesgraduiertenförderung Baden-Württemberg für die finanzielle Förderung im Rahmen seines Promotionsstipendiums.

Literatur

- Ananga, N., Coleman, R., Rizos, C.: Variance-covariance estimation of GPS networks. *Bulletin Géodésique* 68, S. 77–78, 1994.
- Barnes, J.B., Ackroyd, N., Cross, P.A.: Stochastic modelling for very high precision real-time kinematic GPS in an engineering environment. *Proceedings, FIG XXI International Congress, Commission 6, Engineering Surveys*, Brighton, U.K., 19.–25. Juli, S. 61–76, 1998.
- Brunner, F.K., Hartinger, H., Troyer, L.: GPS signal diffraction modelling: the stochastic SIGMA- Δ model. *Journal of Geodesy* 73, S. 259–267, 1999.
- Butsch, F., Kipka, A.: Die Bedeutung des Signal- zu Rauschleistungsverhältnisses und verwandter Parameter für die Messgenauigkeit bei GPS. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)* 111 (2), S. 46–55, 2004.
- Dach, R., Hugentobler, U., Fridez, P., Meindl, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomisches Institut, Universität Bern, Schweiz, 2007.
- Davis, J.L., Herring, T.A.: New atmospheric mapping function. *Center of Astrophysics*, Cambridge, Massachusetts, USA, 1984.
- Estey, L.H., Meertens, C.M.: TEQC: The multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions* 3 (1), S. 42–49, 1999.
- Euler, H., Goad, C.: On optimal filtering of GPS dual frequency observations without using orbit information. *Bulletin Géodésique* 65, S. 130–143, 1991.
- Han, S.: Quality-control issues relating to instantaneous ambiguity resolution for real time GPS kinematic positioning. *Journal of Geodesy* 71, S. 130–143, 1997.
- Han, S., Rizos, C.: Standardization of the variance-covariance matrix for GPS rapid static positioning. *Geomatics Research Australasia* 62, S. 37–54, 1995.
- Hartinger, H., Brunner, F.K.: Variances of GPS phase observations: The SIGMA- ϵ model. *GPS solutions* 2 (4), S. 35–43, 1999.
- Hopfield, H.: Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. *Journal of Geophysical Research* 74 (18), S. 4487–4499, 1969.
- Howind, J.: Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen. *Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft Nr. 584*, 2005.
- Jin, X., de Jong, C.: Relationship between satellite elevation and precision of GPS code observations. *The Journal of Navigation* 49 (2), S. 253–265, 1996.
- Kim, D., Langley, R.B.: Quality control techniques and issues in GPS applications: Stochastic modelling and reliability testing. *Proceedings, Tutorial and Domestic Session, International Symposium on GPS/GNSS*, Jeju, Korea, 7.–9. November, S. 76–85, 2001.
- Landau, H.: Persönliche Kommunikation. Trimble Terrasat GmbH, Höhenkirchen, 2007.
- Langley, R.B.: GPS receiver system noise. *GPS World* 8, S. 40–45, 1997.
- Luo, X., Mayer, M., Heck, B. (2007a): Quantifizierung verschiedener Einflussfaktoren in GNSS-Residuen. *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement*, Jg. 132 (2), S. 97–107, 2007.
- Luo, X., Mayer, M., Heck, B. (2007b): Bestimmung von hochauflösenden Wasserdampffeldern unter Berücksichtigung von GNSS-Doppeldifferenzresiduen. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, Heft-Nr. 2/2007, Universitätsverlag Karlsruhe (TH), Karlsruhe, 2007. Quelle: <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/203/>.
- Luo, X., Mayer, M., Heck, B. (2007c): Erweiterte Modellbildung zur Erzeugung von hochauflösenden Wasserdampffeldern. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten (AVN)*, Heft 5 (2007), S. 179–189, 2007.
- Mayer, M., Wanninger, L., Dick, H.-G., Derenbach, H., Heck, B.: Mehrwegeinflüsse auf den SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs. *Poster, Geodätische Woche 2004*, Stuttgart 12.–15. Oktober 2004. Quelle: https://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/mayer/poster_gw2004/poster_gw_2004_mp.pdf.
- Niell, A.E.: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. *Journal of Geophysical Research* 101, S. 3227–3246, 1996.
- Saastamoinen, J.: Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique* 48, 105, S. 279–298; 48, 106, S. 383–397; 49, 107, S. 13–34, 1973.
- Spilker, J.J.: Tropospheric effects on GPS. In: Parkinson, B.W., Spilker Jr., J.J., Axlarad, P., Enge, P. (Hrsg.), *Global Positioning System: Theory and applications*. Vol. 1, S. 517–546, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, Washington D. C., USA, 1996.
- Talbot, N.: Optimal weighting of GPS carrier phase observations based on the signal-to-noise ratio. *Proceedings, International Symposium on Global Positioning Systems*, Brisbane, Australia, 17.–19. Oktober, S. V.4.1–V.4.17, 1988.
- Tiberius, C., Kenselaar, F.: Estimation of the stochastic model for GPS code and phase observables. *Survey Review* 35, S. 441–454, 2000.
- Trimble: "Mail from Trimble Support", 13. Juli 1999, Subject: SNR Conversions, Trimble_Support@Trimble.com, 1999.
- Wang, J., Steward, M., Tsakiri, M.: Stochastic modelling for static GPS baseline data processing. *Journal of Surveying Engineering* 124 (4), S. 171–181, 1998.
- Wanninger, L., Frevert, V., Wildt, S.: Der Einfluss der Signalbeugung auf die präzise Positionierung mit GPS. *ZfV – Zeitschrift für Vermessungswesen*, Jg. 125, S. 8–16, 2000.
- Wetterzentrale: <http://www.wetterzentrale.de/topkarten/tkdwdar2.htm>, zuletzt besucht am 12.07.2007.
- Wieser, A.: Robust and fuzzy techniques for parameter estimation and quality assessment in GPS. *Dissertation Technische Universität Graz*, Shaker-Verlag, Aachen, 2001.
- Wieser, A., Brunner, F.K.: An extended weight model for GPS phase observations. *Earth, Planets, Space* 52, S. 777–782, 2000.

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Xiaoguang Luo
 Dr.-Ing. Michael Mayer
 Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Bernhard Heck
 Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
 Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe
 Tel.: 0721 608-3668
luo@gik.uni-karlsruhe.de
mmayer@gik.uni-karlsruhe.de
heck@gik.uni-karlsruhe.de