

Quantifizierung verschiedener Einflussfaktoren in GNSS-Residuen

Xiaoguang Luo, Michael Mayer und Bernhard Heck

Zusammenfassung

Die Qualität der Position, die unter Verwendung von Beobachtungen globaler Satellitennavigationssysteme (GNSS) ermittelt wird, ist von den auf die GNSS-Signale wirkenden Einflussfaktoren abhängig und wird weiterhin ebenso von den im Rahmen der Datenverarbeitung verwendeten Methoden und Strategien beeinflusst. Die Auswirkungen der Einflussfaktoren Basislinienlänge und Mehrwegeeffekt sowie die der Auswerteparameter Beobachtungsgewichtung, Neutrosphärenmodellierung und Strategien zur Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten werden unter Analyse der Standardabweichungen von aus Doppeldifferenzresiduen abgeleiteten Größen am Beispiel des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes im Zeitraum DOY2004: 186–193 untersucht und quantifiziert.

Summary

Using observations of global navigation satellite systems (GNSS) for precise point positioning the quality of the results is depending on the effects which are affecting the GNSS signals and on the data processing methods and strategies as well. The effects of the length of the processed baseline, multipath, weighting of observables, neutrospheric modelling, and ambiguity resolution strategies are analysed and quantified by means of root mean square values derived from double difference residuals. As an example, GPS data of the SAPOS® network of Baden-Württemberg in the time span DOY2004: 186–193 are analysed.

1 Einleitung

Die satellitenbasierte Positionierungs- und Navigationstechnik hat in den letzten beiden Jahrzehnten in revolutionärer Weise die geodätische Messtechnik in vielen Bereichen und auf mannigfaltige Weise verändert. Um das volle Genauigkeitspotenzial von globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS) bei geodätischen Anwendungen ausschöpfen zu können, wird auf der Hardwareseite das vorhandene System stetig modernisiert; ebenso wird die im Rahmen der Datenverarbeitung eingesetzte Software kontinuierlich weiterentwickelt, um beispielsweise die auf GNSS-Signale einwirkenden Faktoren von der Erzeugung im GNSS-Satelliten über den Signalweg durch die Erdatmosphäre bis zum Empfang an der Beobachtungsstation im Rahmen der GNSS-Auswertung optimal zu modellieren.

In der geodätischen Praxis bleiben jedoch noch immer die Fragen, welcher Einflussfaktor sich am stärksten bzw. am schwächsten im Auswerteprozess auswirkt oder wie

die Ergebnisse variieren würden, wenn bei der Auswertung andere Parameterwerte angehalten würden, von besonderem Interesse.

Im Folgenden wird eine Beantwortung dieser Fragen für die Einflussfaktoren Basislinienlänge, Mehrwegeeffekte, Beobachtungsgewichtung, Neutrosphärenmodell und Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung angestrebt. Als Untersuchungsparameter werden dabei die Standardabweichungen von aus Doppeldifferenzresiduen (engl.: double difference residuals, DDR) abgeleiteten Größen verwendet. Als Datenmaterial stehen die Beobachtungen aller 16 baden-württembergischen Stationen des SAPOS®-Netzes im Zeitraum DOY2004: 186–193 zur Verfügung.

2 Datengrundlage und Auswertevarianten

Die SAPOS®-Daten stehen mit einer Taktrate von 15 s und einem minimalen Elevationswinkel von 0° zur Verfügung. Für die hier präsentierten Untersuchungen und Analysen wurden auf Grund von stark variablen Wetterbedingungen, die die Auswertungsergebnisse in unterschiedlichem Ausmaß beeinflussen, die Tage 186, 187, 190 und 193 ausgewählt. An den ersten beiden Tagen herrschten über Baden-Württemberg trockene, ruhige und gleichmäßige Wetterbedingungen, während an den beiden letztgenannten Tagen erhebliche Niederschlagsmengen in verschiedenen Netzteilen registriert wurden (Wetterzentrale 2006).

Auf dem Hintergrund der in Mayer et al. (2004) beschriebenen Untersuchungen zur Quantifizierung der Mehrwegeeffekte der SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs können alle bei der im Folgenden erläuterten Grundlagenstudie berücksichtigten Stationen hinsichtlich der Mehrwegebelastung klassifiziert und in drei Gruppen (Mehrwegebelastung: stark/mittel/gering) eingeteilt werden, siehe hierzu Abb. 1 und Tab. 1.

Für die GNSS-Auswertung wird die Station Tübingen (TUEB), die sich im Vergleich zu anderen Stationen durch eine sehr geringe Mehrwegebelastung auszeichnet, als Referenzstation gewählt, zu der von den übrigen Netzstationen Basislinien gebildet und verarbeitet werden. Des Weiteren liegt TUEB in der Mitte des baden-württembergischen SAPOS®-Netzes, wodurch eine günstige Netzgeometrie hinsichtlich der Basislinienlänge erzielt werden kann.

Über diese Grundlagenstudie hinausgehend wird aktuell am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe

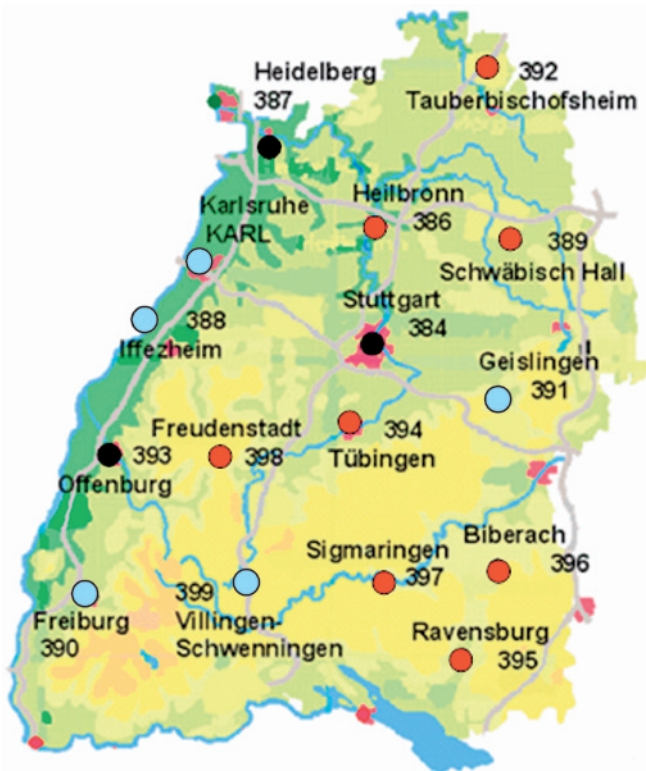


Abb. 1: SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs (SAPOS® Informationen 2006); schwarze/blau/rote Kreissignatur: starke/mittlere/geringe Mehrwegeeffekte nach Mayer et al. (2004)

(TH) die Stationsqualität der SAPOS®-Stationen basierend auf Signal-Rausch-Verhältnis-Werten untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bestätigen die gute Qualität der Referenzstation TUEB.

In Tab. 1 sind alle Stationen und deren im weiteren Verlauf der Arbeit verwendeten Abkürzungen sowie deren Abstände zur Referenzstation TUEB zusammengestellt. Wichtige Charakteristika der angewandten und

Tab. 1: SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs

Stationsname	Abkürzung	Basislinienlänge zu TUEB [km]	Mehrwegebelastung
Stuttgart	STUT	30,0	stark
Karlsruhe	KARL	72,5	mittel
Heilbronn	HLBR	70,1	gering
Heidelberg	HEID	100,8	stark
Iffezheim	IFFE	77,7	mittel
Schwäbisch Hall	SCHA	81,5	gering
Freiburg	FREI	106,9	mittel
Geislingen	GEIS	55,6	mittel
Tauberbischofsheim	TAUB	131,0	gering
Offenburg	OFFE	81,8	stark
Tübingen	TUEB	–	gering
Ravensburg	RAVE	90,1	gering
Biberach	BIBE	71,8	gering
Sigmaringen	SIGM	49,9	gering
Freudenstadt	FSTA	47,7	gering
Villingen-Schwenningen	VISC	66,6	mittel

untersuchten Auswertevarianten sind in Tab. 2 zusammengefasst.

Um die Einflüsse der oben angeführten Auswerteparameter untersuchen zu können, werden für jede Basislinie verschiedene Sätze von DDR erzeugt, die sich hinsichtlich

- des stochastischen Modells (mit/ohne Beobachtungsgewichtung),

Tab. 2: Parametereinstellungen der Datenprozessierung

Parameter	Charakteristik
Auswertegröße	GPS-Phasenbeobachtung; Doppeldifferenz
Abtastrate	180 Sekunden
Minimaler Elevationswinkel	10°
Orbits und Erdrotationsparameter	präzise IGS-Information
Stationskoordinaten	TUEB als Referenzstation (fixed)
Neutrosphärisches Prädiktionsmodell	Saastamoinen-Modell
Gültigkeit neutrosphärischer Zusatzparameter	2 Stunden
Antennenkorrektur	Absolute Kalibrierwerte

Tab. 3: Untersuchte Auswertevarianten

Einflussfaktor	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Gewichtung	$\cos^2 z$	gleichgewichtig	$\cos^2 z$	$\cos^2 z$
Neutrosphäre Zusatzparameter	$MF_{Niell,wet}$	$MF_{Niell,wet}$	$1/\cos z$	$MF_{Niell,wet}$
Phasenmehrdeutigkeitslösung	SIGMA (L5 & L3)	SIGMA (L5 & L3)	SIGMA (L5 & L3)	QIF (L1 & L2)

- der Neutrosphärenmodellierung (Saastamoinen (1973) bzw. Niell (1996)) sowie
- der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung (SIGMA bzw. QIF)

unterscheiden. Die wichtigsten Charakteristika der sich daraus ergebenden vier Auswertvarianten sind in Tab. 3 zusammengefasst. Detaillierte Informationen zu den verwendeten Strategien zur Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten sind z.B. Hugentobler et al. (2005) zu entnehmen.

3 Datenaufbereitung

Eine grundlegende Technik der Auswertung von GNSS-Beobachtungen basiert auf der Ausgleichung von Doppeldifferenzen von Phasenmessungen nach der Methode der kleinsten Quadrate. Nach dem Ausgleichungsprozess ergeben sich mit den DDR die Residuen dieser Auswertgröße. Als Beispiel stellt Abb. 2 den zeitvariablen DDR-Verlauf für zwei Stationen (TUEB, OFFE) und zwei

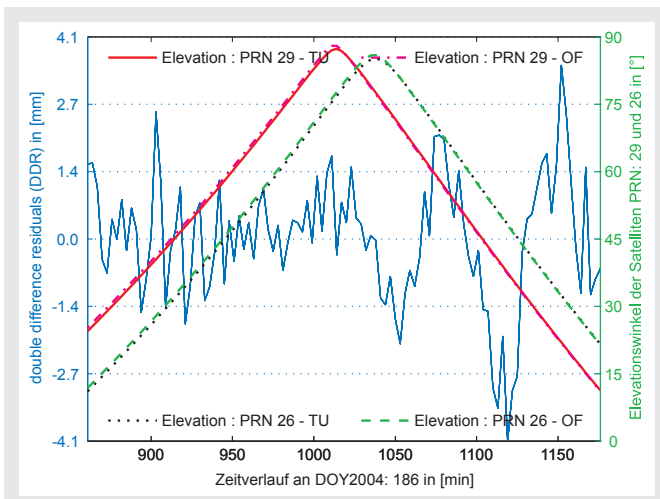


Abb. 2: DDR-Verlauf; Basislinie: TUEB-OFFE, PRN: 29-26; DOY2004: 186

Satelliten (PRN: 29, 26) mit den entsprechenden Elevationen dar.

Für die weitere Datenanalyse werden die DDR epochenweise stations- und satellitenbezogen gespeichert, hierzu wurde die Berner GPS Software Version 5.0 (Hugentobler et al. 2005) modifiziert; siehe hierzu Howind (2005) sowie Luo et al. (2007).

Doppeldifferenzen von GNSS-Phasenbeobachtungen zeichnen sich dadurch aus, dass bei kurzen Basislinien die Einflüsse der Atmosphäre auf Grund ähnlicher Signalwege weitgehend eliminiert werden, ebenso entfallen Bahn- und Uhrfehler (Hofmann-Wellenhopf et al. 2001). Zur Beurteilung stationsspezifischer Einflussfaktoren (z.B. Mehrwegeeffekte) sind diese Beobachtungsgrößen jedoch nur eingeschränkt geeignet, da insgesamt vier Signalwege zwischen zwei Satelliten und zwei Stationen zu einem DDR beitragen. Um Informationen bezüglich eines Signalwegs erhalten zu können, werden im Folgenden DDR nach dem in Alber et al. (2000) vorgestellten Verfahren mittels Zusatzbedingungen in zwei Schritten verarbeitet, wodurch eine geeignetere Analyse der oben genannten Einflussfaktoren erfolgen kann.

Das primär für die Gewinnung von Informationen über die Verteilung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts in Richtung einzelner Satelliten entwickelte Verfahren von Alber et al. (2000) wird im Rahmen dieser Arbeit verwendet, um eindeutig interpretierbare Größen des Beobachtungsraums zu erhalten, deren Analyse aussagekräftiger erscheint als DDR-basierte Analysen.

3.1 Konvertierung der DDR

Die im Folgenden aus DDR abgeleiteten und analysierten Größen entsprechen nicht notwendigerweise den Residuen undifferenzierter Beobachtungen, da z.B. gemeinsame Anteile der originären GNSS-Beobachtungen durch Differenzierungstechniken eliminiert werden. Aus diesem Grund werden abgeleitete Größen im weiteren Verlauf als Pseudo-Residuen bezeichnet. Es ergeben sich somit die Akronyme PSDR (engl.: pseudo single difference residuals) und PZDR (engl.: pseudo zero difference residuals).

Die Konvertierung von DDR in PSDR wird für eine Basislinie unter Verwendung mehrerer Satelliten epochenweise durchgeführt. In Abb. 3 ist das Prinzip dieses Konvertierungsschrittes schematisch dargestellt.

Die grundlegende Beziehung zwischen DDR und PSDR ist schematisch dargestellt. In Abb. 3 ist das Prinzip dieses Konvertierungsschrittes schematisch dargestellt.

Die grundlegende Beziehung zwischen DDR und PSDR ist schematisch dargestellt.

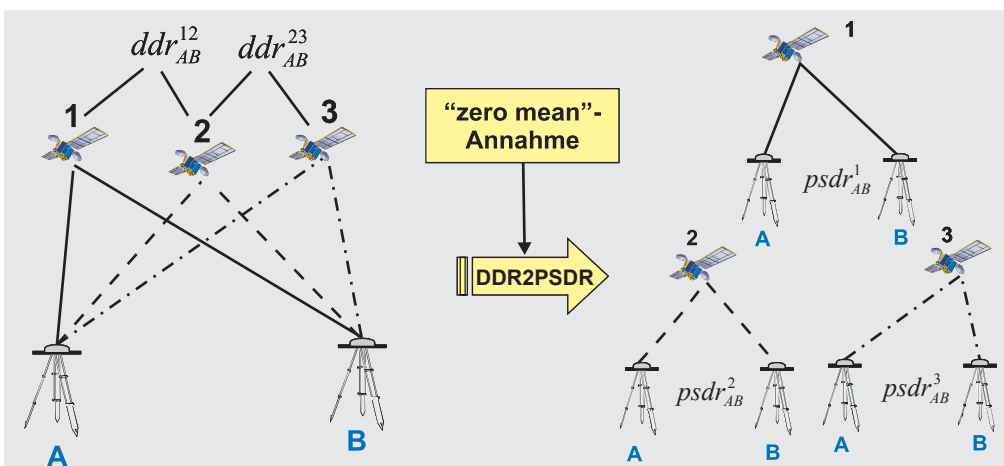


Abb. 3: Schematische Darstellung des Prinzips der Konvertierung von DDR in PSDR

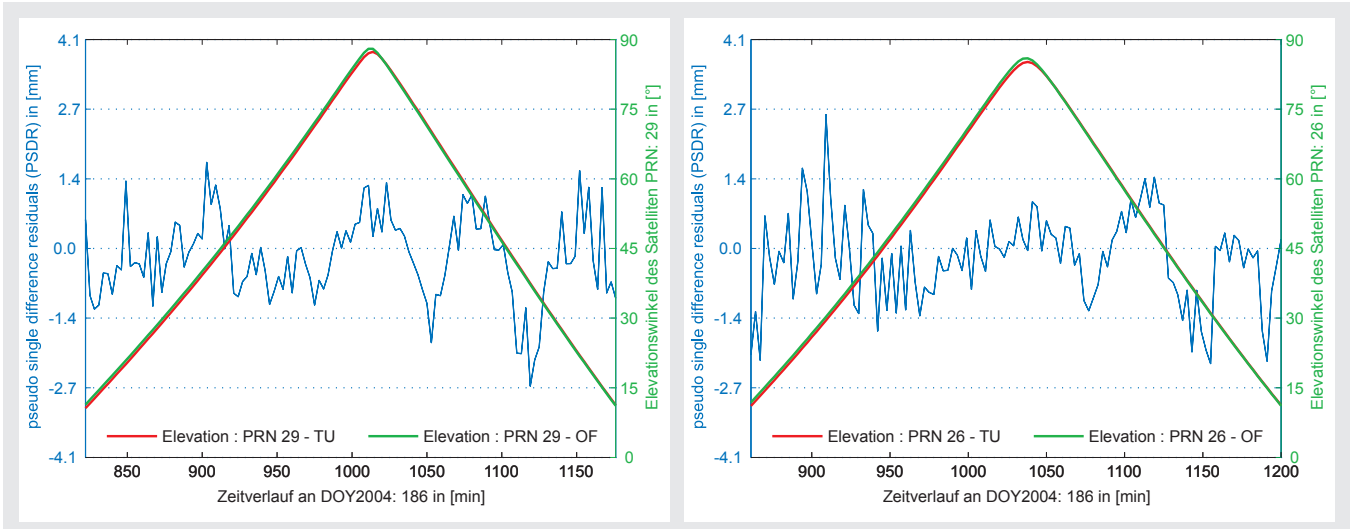


Abb. 4: PSDR-Verlauf; Basislinie: TUEB-OFFE; links: PRN: 29, rechts: PRN: 26; DOY2004: 186

und PSDR lässt sich in Matrizenform folgendermaßen ausdrücken:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n w^i psdr_{AB}^i &= 0 \\ \begin{bmatrix} ddr_{AB}^{12} \\ ddr_{AB}^{23} \\ \vdots \\ ddr_{AB}^{n-1,n} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} w^1 psdr_{AB}^1 + \dots + w^n psdr_{AB}^n \\ psdr_{AB}^1 - psdr_{AB}^2 \\ psdr_{AB}^2 - psdr_{AB}^3 \\ \vdots \\ psdr_{AB}^{n-1} - psdr_{AB}^n \end{bmatrix} \\ \underbrace{\begin{bmatrix} w^1 & w^2 & w^3 & \dots & w^n \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}}_{D_I} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} psdr_{AB}^1 \\ psdr_{AB}^2 \\ psdr_{AB}^3 \\ \vdots \\ psdr_{AB}^n \end{bmatrix}}_{PSDR} &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Dabei ist die Struktur der Designmatrix D_I von der Reihenfolge der Satellitennummern der gespeicherten DDR abhängig. Für eine aus n PSDR gebildete Basislinie zwischen den Stationen A und B sind nach durchgeführter Differenzbildung nur $(n-1)$ linear unabhängige DDR vorhanden, so dass Restriktionen notwendig werden, um eine Rücktransformation zu ermöglichen. Hierzu wird in die Designmatrix eine Gewichtszeile als erste Zeile in Gl. (1) eingeführt. Um mit der Gewichtung der Berner GPS Software Version 5.0 (BS5) konsistent zu bleiben, wird das elevationswinkel- bzw. zenitdistanzabhängige Gewicht w^i

$$w^i = \sin^2 E_{AB}^i = \cos^2 z_{AB}^i \quad (2)$$

verwendet. Dabei entspricht E_{AB}^i dem Mittelwert der Elevationswinkel E_A^i und E_B^i des Satelliten i und z_{AB}^i dem Mittelwert der Zenitdistanzen z_A^i und z_B^i des Satelliten i jeweils bzgl. der Stationen A bzw. B. Auf Grund der geringen Basislinienlänge (Maximum: 131 km) und eines maximalen Höhenunterschieds von 1300 m ist beim be-

handelten Fallbeispiel eine satellitenbezogene Mittelbildung der Elevationswinkel bzw. Zenitdistanz der Basislinienstationen zulässig. Abschätzungen nach Wanninger (2000) ergeben maximale Elevationswinkel- bzw. Zenitdistanzunterschiede von ca. 3,5°. Die oben genannten Restriktionen lassen sich in Abhängigkeit von den berechneten Gewichten (Gl. (2)) und den gesuchten PSDR ausdrücken, indem die Summe der gewichteten PSDR von mehreren Satelliten für eine Basislinie zu Null gesetzt wird. Diese Art von Restriktionen wird in Alber et al. (2000) als »zero mean«-Annahme bezeichnet. In Abb. 4 sind die aus den in Abb. 2 visualisierten DDR abgeleiteten PSDR dargestellt.

Die anschließende Konvertierung von PSDR in PZDR wird satellitenbezogen durchgeführt. Das Prinzip dieses Konvertierungsschritts ist in Abb. 5 schematisch veranschaulicht. Die im Rahmen der GNSS-Auswertung gewählte Referenzstation wird in diesem Konvertierungsprozess als Bezugstation definiert.

Hierbei lässt sich die Beziehung zwischen PSDR und PZDR mittels Matrizen wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned} \sum_{i=A}^Z w_i^i pzdr_i^i &= 0 \\ \begin{bmatrix} psdr_{AB}^i \\ psdr_{AC}^i \\ \vdots \\ psdr_{AZ}^i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} w_A^i pzdr_A^i + \dots + w_Z^i pzdr_Z^i \\ pzdr_A^i - pzdr_B^i \\ pzdr_A^i - pzdr_C^i \\ \vdots \\ pzdr_A^i - pzdr_Z^i \end{bmatrix} \\ \underbrace{\begin{bmatrix} w_A^i & w_B^i & w_C^i & \dots & w_Z^i \\ 1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -1 \end{bmatrix}}_{D_Z} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} pzdr_A^i \\ pzdr_B^i \\ pzdr_C^i \\ \vdots \\ pzdr_Z^i \end{bmatrix}}_{PZDR} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

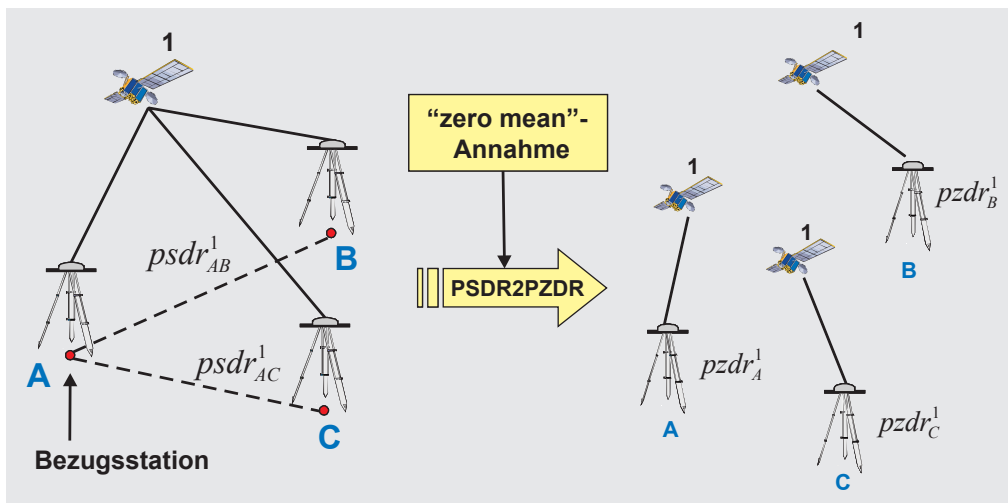


Abb. 5: Schematische Darstellung des Prinzips der Konvertierung von PSDR in PZDR

Da eine Station bei dieser Konvertierung als Bezugsstation zu wählen ist, wird die Struktur der Designmatrix D_2 durch die Definition der Basislinien festgelegt. Zur Berechnung der PZDR wird eine Gewichtung in Analogie zu Gl. (2) vorgenommen, wodurch eine reguläre und inver-

tierbare Designmatrix D_2 erhalten wird. In Abb. 6 sind die aus den in Abb. 4 veranschaulichten PSDR abgeleiteten PZDR dargestellt. Werden die PZDR gleicher Satelliten analysiert, ist deutlich zu erkennen, dass TUEB-bezogene PZDR eine kleinere Variation aufweisen als die PZDR der Station OFFE. Dies ist auf die bessere Stationsqualität der Referenzstation TUEB zurückzuführen.

Beide Konvertierungsschritte basieren auf der »zero mean«-Annahme. Somit ist das in Alber et al. (2000) vorgestellte Verfahren nicht hypothesenfrei. Wird im Anwendungsbeispiel davon ausgegangen, dass der Neutrosphäre in DDR eine dominierende Rolle zukommt, lässt sich die »zero mean«-Annahme

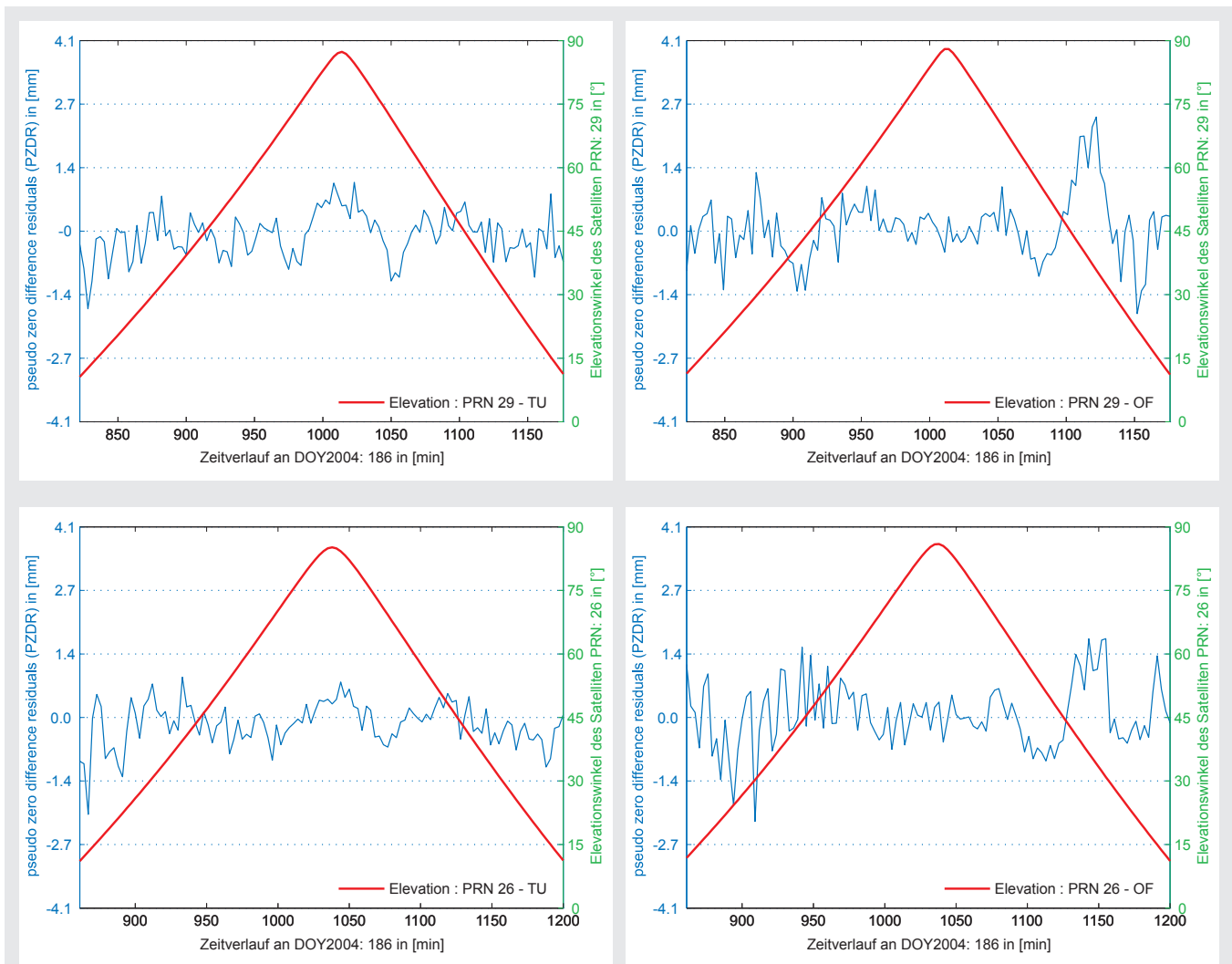


Abb. 6: PZDR-Verlauf; DOY2004: 186; oben links: 29-TUEB, oben rechts: 29-OFFE, unten links: 26-TUEB, unten rechts: 26-OFFE;

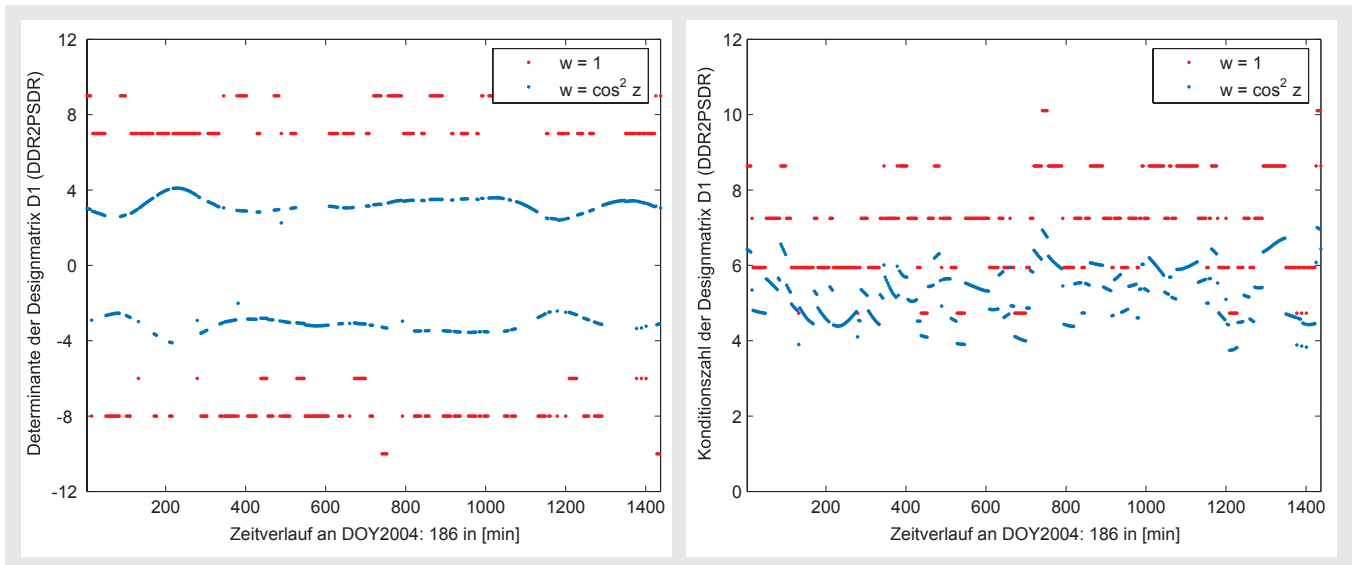


Abb. 7: Determinanten (links) und Konditionszahlen (rechts) der Designmatrix D1; Basislinie: TUEB-SCHA, DOY2004: 186

in diesem Fall so interpretieren, dass der über das ganze SAPOS®-Netz bzw. für einzelne Basislinien gemittelte residuale Anteil der neutrophären Laufzeitverzögerung in jeder Epoche zu Null führt. Für große Netzausdehnungen (~100 km) ist diese Annahme nach Alber et al. (2000) im Allgemeinen gültig, da die Verteilung des für die Residuen vornehmlich verantwortlichen atmosphärischen Bestandteils »Wasserdampf« über einem großen Gebiet als zufällig angesehen werden kann. Demzufolge kann ohne Einschränkung der Allgemeinheit davon ausgegangen werden, dass DDR ebenso zufällig verteilt sind. Basierend auf den in Luo et al. (2007) detailliert beschriebenen statistischen Untersuchungen sind DDR normalverteilt.

Weicht die Summe der gewichteten Pseudo-Residuen von Null ab, werden diese Restfehler auf alle beteiligten PSDR bzw. PZDR verteilt. Das bedeutet, je mehr Satelliten bzw. Stationen zur Konvertierung beitragen, desto geringer wirken sich die Restfehler auf die einzelnen Konvertierungsergebnisse aus und umso zuverlässiger ist die »zero mean«-Annahme. Siehe hierzu auch Braun und Rocken (2002).

3.2 Untersuchungen zur numerischen Stabilität

Da der Ansatz nach Alber et al. (2000) im Rahmen dieser Arbeit grundlegend für die weiteren Untersuchungen ist, scheint es sinnvoll, nach den beiden in Kapitel 3.1 beschriebenen Konvertierungsschritten eine Betrachtung der numerischen Stabilität der Inversen durchzuführen. Hierzu werden die Kenngrößen Determinante und Konditionszahl der Designmatrix D_1 (Gl. (1)) und der Designmatrix D_2 (Gl. (3)) untersucht und grafisch veranschaulicht.

Die Determinante einer invertierbaren Matrix darf nicht gleich Null sein. Um eine gutartige numerische Sta-

bilität bei der Invertierung zu erzielen, sollte sich die Größenordnung der Determinante nicht nahe bei Null befinden. Die Konditionszahl einer Matrix stellt ein Maß für die Sensitivität der Lösung eines linearen Gleichungssystems dar und beschreibt den Faktor, um den Eingangsfehler im ungünstigsten Fall verstärkt werden. Häufig wird die Konditionszahl als Indikator für die Invertierungsgenauigkeit einer Matrix gebraucht und zu Genauigkeitsuntersuchungen der Lösung von linearen Gleichungssystemen verwendet. Eine Einheitsmatrix hat die Konditionszahl 1. Ist die Konditionszahl einer Matrix deutlich größer als 1, ist die Matrix schlecht konditioniert.

In Abb. 7 sind die Determinanten und die Konditionszahlen der Designmatrix D_1 für die repräsentative Basislinie TUEB-SCHA an DOY2004: 186 zeitabhängig dargestellt. Zum Vergleich wird die Matrix D_1 leicht modifiziert, indem alle Gewichte zu 1 gesetzt werden. Diese gleichgewichtete Auswertvariante kann auch als »ohne Gewichtung« bezeichnet werden, da alle Residuen bei der Konvertierung gleich behandelt werden. Die entsprechenden Determinanten und Konditionszahlen sind in Abb. 7 rot gekennzeichnet.

Auf Grund des Dimensionsunterschieds der Designmatrix D_1 verschiedener Epochen weisen die Determinanten wechselnde Vorzeichen auf. Das Niveau der Determinanten ist jedoch zeitlich stabil und liegt bei ca. -4 bzw. 4. Im Vergleich zum gleichgewichteten Ansatz weist die Matrix D_1 kleinere Konditionszahlen auf, da das elevationsabhängige Gewichtsmodell der Realität besser entspricht als das gleichgewichtete Modell. Die Konditionszahlen der Matrix D_1 liegen im Mittel bei ca. 5 und variieren in einer Bandbreite von ± 1 . Basierend auf dem stabilen Verlauf der Determinante und der kleinen Größenordnung der Konditionszahlen ist davon auszugehen, dass numerische Stabilität der Designmatrix D_1 , die zur Konvertierung von DDR in PSDR verwendet wird, gewährleistet ist.

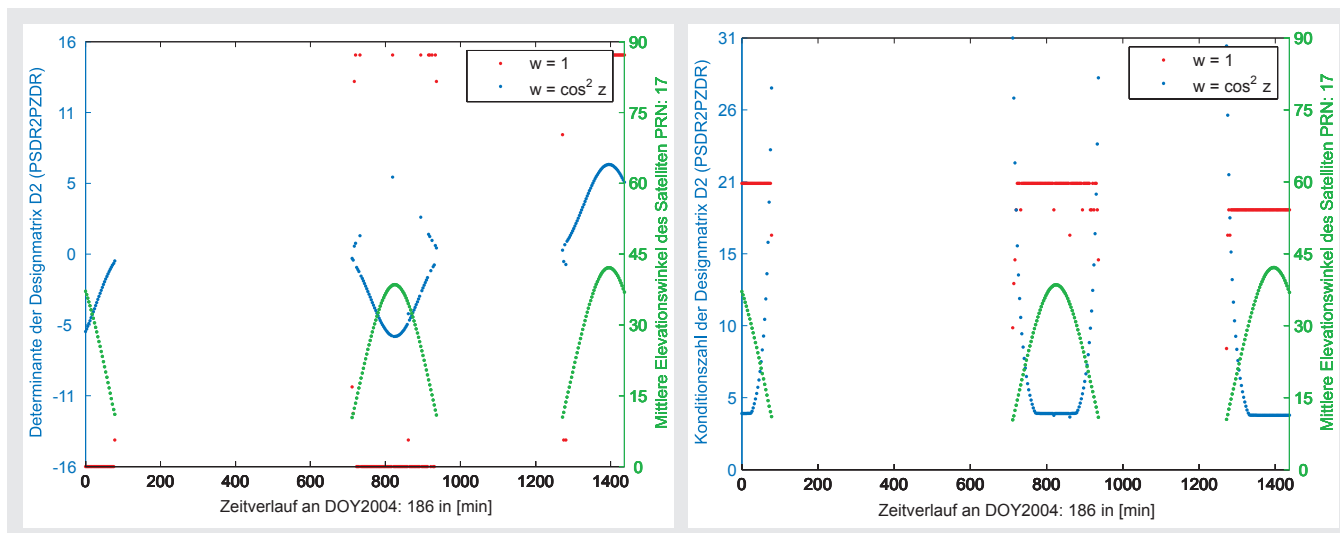


Abb. 8: Determinanten (links) und Konditionszahlen (rechts) der Designmatrix D₂; Satellit: PRN 17, DOY2004: 186

Auf ähnliche Weise kann die Designmatrix D_2 analytisch untersucht werden. Die Konvertierung von PSDR in PZDR erfolgt satellitenbezogen basierend auf mehreren Stationen. Abb. 8 stellt die Determinanten und Konditionszahlen der Designmatrix D_2 für den repräsentativen Satelliten PRN 17 an DOY2004: 186 zeitabhängig dar, wobei ergänzend der mittlere Elevationswinkel des Satelliten epochenweise veranschaulicht wird.

In Abb. 8 ist deutlich zu erkennen, dass sowohl die Determinanten als auch die Konditionszahlen der Matrix D_2 mit dem mittleren Elevationswinkel des Satelliten hoch korreliert sind. Mit abnehmendem Elevationswinkel nähert sich der Wert der Determinanten Null. Im niedrigen Elevationsbereich ($E < 20^\circ$) nimmt die Konditionszahl mit abnehmender Elevation rasch zu. Beispielsweise hat die Konditionszahl bei einem Elevationswinkel von ca. 10° einen Wert von ca. 30. Im Vergleich zum Verhalten der Matrix D_1 scheint die Matrix D_2 bei der Invertierung weniger stabil zu sein. Dies ist auf die satellitenbezogene

Vorgehensweise dieses Konvertierungsschritts von PSDR in PZDR zurückzuführen, wobei der Satellitenkonstellation eine wichtige Rolle zukommt. Stabilität ist insbesondere für das elevationsabhängige Gewichtsmodell gegeben.

Unter Berücksichtigung aller vorhandenen Satelliten liegt der kleinste Zahlenwert aller berechneten Determinanten bei ca. 0,1, was im Rahmen der Konvertierung von PSDR in PZDR keinerlei Invertierungsprobleme erwarten lässt. In Abb. 9 wird ergänzend die absolute Häufigkeit der Konditionszahlen aller Satelliten dargestellt. Mehr als 80% der Konditionszahlen liegen unter 10. Es ist ersichtlich, dass die Designmatrix D_2 als numerisch stabil anzusehen ist.

4 PZDR-basierte Validierung von GNSS-Einflussfaktoren

Bevor die eigentlichen Untersuchungsergebnisse beschrieben werden, erscheint eine kurze Charakterisierung der systematischen Einflussfaktoren sinnvoll. Systematische Einflüsse können in netzspezifische und auf die Auswertestrategie bezogene Faktoren unterteilt werden. Zu den netzspezifischen Einflussfaktoren ist neben der Länge der Basislinien die Intensität der Mehrwegebelastung zu zählen; zu den von der Auswertestrategie abhängigen Faktoren gehören die Beobachtungsgewichtung, die Neutrosphärenmodellierung sowie die Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung.

Die im Folgenden beschriebene, mit dem Ziel der Bestimmung der Größenordnung der GNSS-immanenten Einflussfaktoren durchgeführte Untersuchung basiert auf der Analyse der stationsbezogenen Standardabweichungen von PZDR. Hierzu werden für jede Beobachtungsstation die Standardabweichungen von PZDR-Zeitreihen jedes sichtbaren Satelliten berechnet. Die daraus

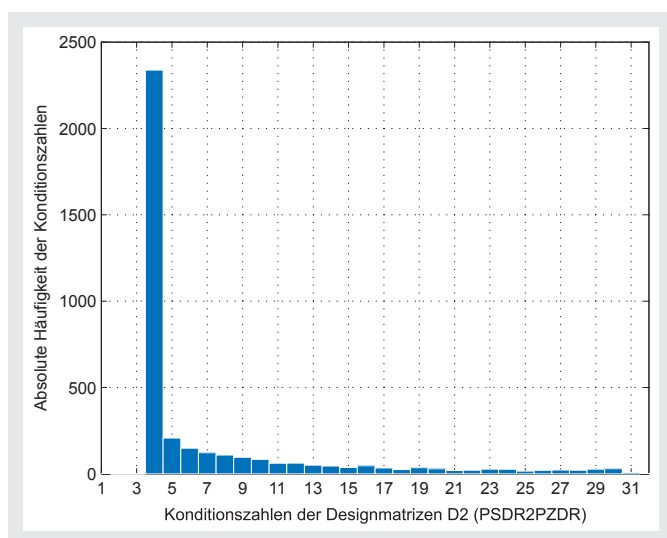


Abb. 9: Absolute Häufigkeit der Konditionszahlen aller Satelliten; DOY2004: 186

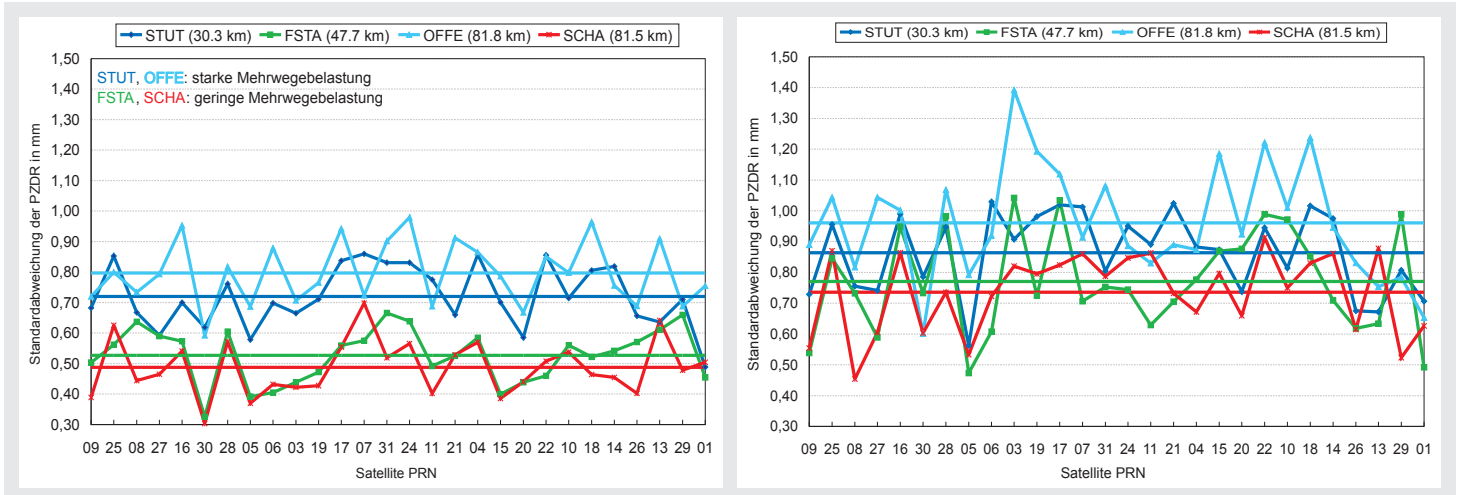


Abb. 10: Einflüsse von Mehrwegeeffekten und Basislinienlänge; links: DOY2004: 186, rechts: DOY2004: 190

resultierenden Ergebnisse werden analysiert und grafisch dargestellt. Aus allen satellitenbezogenen Standardabweichungen wird anschließend ein stationsbezogener Mittelwert gebildet.

Aus diesen stationsbezogenen Mittelwerten können des Weiteren Gruppenmittelwerte beispielsweise in Abhängigkeit von der Stärke der Mehrwegebelastung berechnet und tabellarisch dargestellt werden. Durch Vergleich der Ergebnisse verschiedener GPS-Tage (z.B. ruhige, ungestörte Neutrosphäre an DOY2004: 186; bewegte, teilweise stark gestörte Neutrosphäre an DOY2004: 190) können ebenso die Einflüsse der Wetterbedingungen auf die Standardabweichungen der PZDR ermittelt werden.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Bestimmung der Größenordnung der Einflussfaktoren prinzipiell unter Anwendung alternativer Streuungsmaße (z.B. Spannweite, mittlere absolute Abweichung) erfolgen kann. Auf die Analyse von gewichteten quadratischen Standardabweichungen wird aus Laufzeitaspekten verzichtet. Der Mittelwert der abgeleiteten PZDR erscheint als Untersuchungsgröße ungeeignet, da keine Informationen bezüglich der Variationsstärke der zu untersuchenden Einflussfaktoren beinhaltet sind.

Im Folgenden werden die Ergebnisse für die repräsentativen Stationen STUT, OFFE, FSTA und SCHA exemplarisch dargestellt. STUT und FSTA weisen eine vergleichbare Entfernung zu TUEB auf, OFFE und SCHA ebenso, jedoch ist die Entfernung der letztgenannten Punktgruppe mit ca. 81 km nahezu doppelt so groß wie die der erstgenannten. Des Weiteren sind die Mehrwegebelastungen unterschiedlich: während STUT und OFFE stark belastet sind, weisen FSTA und SCHA eine nur sehr geringe Belastung durch Mehrwegeeffekte auf.

4.1 Einflüsse von Basislinienlänge und Mehrwegeeffekt

Die berechneten Standardabweichungen der PZDR zwischen den einzelnen Satelliten und den ausgewählten

Stationen an den GPS-Tagen 186 und 190 werden zur Veranschaulichung der Einflüsse von Basislinienlänge und Mehrwegebelastung in Abb. 10 dargestellt.

Der jeweilige vertikale Abstand zwischen den oberen und den unteren in Abb. 10 visualisierten Kurvenpaaren stellt den Einfluss bzw. die Größenordnung des Einflusses der Mehrwegebelastung auf die Standardabweichungen der PZDR dar und beträgt mehr als 0,25 mm. Veranschaulicht werden in Abb. 10 Ergebnisse in Abhängigkeit von einer ruhigen (links) bzw. bewegten Neutrosphäre (rechts), wobei die relative Lage der unter Berücksichtigung aller Satelliten berechneten Mittelwertgeraden an beiden Tagen erhalten bleibt. Wie zu erwarten, ergeben sich bei unruhiger Neutrosphäre höhere Standardabweichungen. Zur Quantifizierung des Mehrwegeefflusses werden die vier oben angeführten Basislinien ausgehend von der qualitativ hochwertigen, in der Mitte des SAPOS®-Netzes gelegenen Station TUEB herangezogen. FSTA und SCHA (STUT und OFFE) zeichnen sich durch eine geringe (hohe) Mehrwegebelastung aus, was sich in den Standardabweichungen der PZDR deutlich widerspiegelt. Die Einflüsse der Basislinienlänge schlagen sich im Abstand der beiden Kurven der Stationen gleicher Mehrwegebelastung nieder (z.B. FSTA, SCHA). Dieser Unterschied liegt deutlich unter 0,1 mm. Bei feuchten Wetterbedingungen (DOY2004: 190) treten die Einflüsse des Wetters bzw. der Neutrosphäre gegenüber den Mehrwegeeffekten in den Vordergrund. Dies führt zu einem Zusammenrücken von oberem und unterem Kurvenpaar.

4.2 Einflüsse der Beobachtungsgewichtung

In Abb. 11 werden zur Quantifizierung des Einflusses der Beobachtungsgewichtung die PZDR-Standardabweichungen der Stationen OFFE und SCHA für die beiden GPS-Tage 186 und 190 dargestellt. Dabei entsprechen die gestrichelten Linien Standardabweichungen von PZDR-Zeitreihen, ermittelt ohne elevationsabhängige Gewichtung (gleichgewichtete Beobachtungen), während die

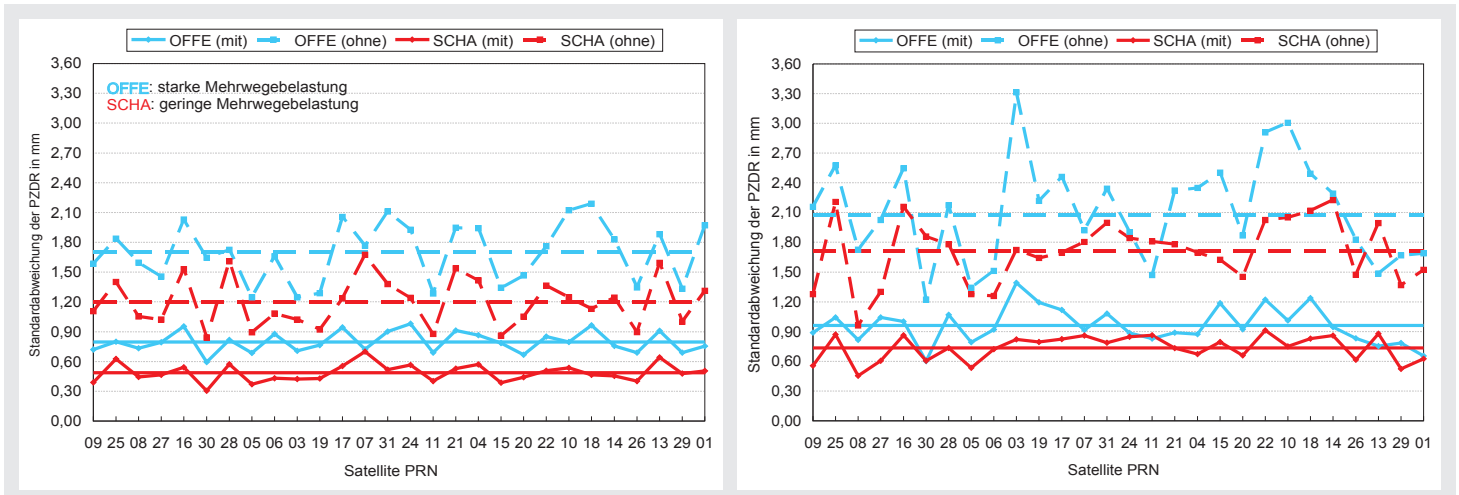


Abb. 11: Einflüsse der elevationsabhängigen Beobachtungsgewichtung; links: DOY2004: 186, rechts: DOY2004: 190

durchgezogenen Linien die Ergebnisse mit elevationsabhängiger Gewichtung veranschaulichen.

Da die beiden ausgewählten Stationen OFFE und SCHA nahezu identische Abstände (ca. 81 km) zu TUEB aufweisen, variieren die Ergebnisse insbesondere auf Grund der Mehrwegebelastung. Es ist ersichtlich, dass die Gewichtung bei Größenordnung und Variation der PZDR-Standardabweichungen eine entscheidende Rolle spielt. Diese Einflüsse betragen ca. 0,7 mm an der Station SCHA. Die Wetterbedingungen wirken sich auf die Ergebnisse mit elevationsabhängiger Gewichtung mit ca. 0,2 mm aus, auf die Ergebnisse ohne Gewichtung hingegen mit ca. 0,5 mm. Das bedeutet, dass eine elevationsabhängige Gewichtung zur Stabilisierung der PZDR bei feuchtem Wetter einen großen Beitrag leisten kann. Der Abstand zwischen den beiden Linien gleicher Signatur ist auf unterschiedliche Mehrwegeeinflüsse zurückzuführen.

4.3 Einflüsse von Neutrosphärenmodellierung und Festsetzungsstrategie der Phasenmehrdeutigkeiten

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden untersuchten Neutrosphärenmodellierungen

- Prädiktionsmodell: Saastamoinen, Abbildungsfunktion: $MF_{1/\cos z}$
- Prädiktionsmodell: Saastamoinen, Abbildungsfunktion: $MF_{Niell, wet}$

liegt in der Abbildungsfunktion. Da alle Abbildungsfunktionen in erster Näherung durch $1/\cos z$ approximiert werden können, sind die durch die Variation der Abbildungsfunktion entstehenden Unterschiede der PZDR-Standardabweichungen jedoch sehr gering. Um diese Unterschiede analysieren zu können, werden Differenzen von PZDR-Standardabweichungen zwischen beiden neutrosphärischen Modellbildungen am jeweils selben GPS-Tag gebildet. Die Differenzen liegen in der Regel unter 0,01 mm. Trotzdem ist ein Unterschied der Variationsbreite auf Grund der Basislinienlänge feststellbar. Bei feuchten

Wetterbedingungen steigen die absoluten Werte der Standardabweichungen an den Stationen mit geringer Mehrwegebelastung (TAUB) um ca. 0,13 mm an. Unter solchen Wetterbedingungen treten größere Differenzen zwischen den beiden Neutrosphärenmodellierungen auf.

Zur Quantifizierung der Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung auf die Standardabweichungen von PZDR werden die SIGMA- und die QIF-Strategie analysiert. Auf Grund der geringfügigen Unterschiede zwischen den Standardabweichungen gleicher GPS-Tage wird ebenfalls auf Differenzbildung der Standardabweichungen übergegangen. Die Differenzen liegen in der Regel im Intervall von $\pm 0,02$ mm. Durch das Hilfsmittel der Differenzbildung sind diese Analysen um die Einflüsse der Wetterbedingungen reduziert. Im Vergleich zu den Auswirkungen der Variation der neutrosphärischen Modellierung sind die Einflüsse der Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung auf die Unterscheidungsgröße PZDR-Standardabweichung gegenüber Wetterbedingungen weniger sensitiv. Werden die absoluten Werte der Standardabweichungen betrachtet, so liegen die Einflüsse der Wettersituation an Stationen mit geringer Mehrwegebelastung (TAUB) bei ca. 0,13 mm.

4.4 Quantifizierung der untersuchten Einflussfaktoren

Nach der für ausgewählte Basislinien exemplarisch dargestellten Analyse der einzelnen Einflussfaktoren können diese für alle Basislinien des SAPOS®-Netzes zueinander in Relation gesetzt werden. Die mittlere Basislinienlänge aller drei nach der Mehrwegebelastung (gering, mittel, stark) sortierten Gruppen liegt bei ca. 75 km, dadurch können die mittleren PZDR-Standardabweichungen für alle drei Gruppen unter verschiedenen Aspekten in Tab. 4 zusammengestellt und miteinander verglichen werden.

Zwar können die Stationen nach der Stärke der Mehrwegebelastung in drei Gruppen eingeteilt werden, aber innerhalb einer Gruppe wirken sich die Mehrwegeeinflüsse

Tab. 4: PZDR-Standardabweichungen (STD) für Mehrwegebelastungsgruppen, DOY2004: 186

Einteilung nach Mehrwegebelastung	mittlere Basislinienlänge [km]	Gewichtung mittlere STD [mm]		Basislinienlänge STD [mm]	
		mit	ohne	[kurz-Mittel]	[lang-Mittel]
stark	71,0	0,73	1,63	0,01	0,06
mittel	75,9	0,61	1,40	0,03	0,05
gering	77,6	0,53	1,25	0,00	0,00

Einteilung nach Mehrwegebelastung	mittlere Basislinienlänge [km]	Phasenmehrdeutigkeitslösung mittlere STD [mm]		Neutrosphärenmodelle mittlere STD [mm]	
		SIGMA	QIF	NIELL	1/cosz
stark	71,0	0,7300	0,7296	0,7300	0,7304
mittel	75,9	0,6122	0,6073	0,6122	0,6107
gering	77,6	0,5290	0,5284	0,5290	0,5297

auf Grund der örtlichen Gegebenheiten an jeder Station unterschiedlich aus. Diese Eigenschaft von Mehrwegeinflüssen führt zu einer Schwierigkeit bei der Quantifizierung des Einflusses der Basislinienlänge, deshalb wird innerhalb einer Gruppe die Differenz zwischen der Standardabweichung für die kürzeste und die längste Basislinie zum Gruppenmittelwert gebildet. Hierdurch wird die Größenordnung der Einflüsse der Basislinienlänge transparenter. Es ist festzustellen, dass die Einflüsse der Mehrwegeeffekte auf die Standardabweichungen von PZDR-Zeitreihen größer sind als die der Basislinienlänge.

Basierend auf Gruppenmittelwerten ist jedoch eine Beurteilung der Frage, ob die Strategie zur Festsetzung der Phasenmehrdeutigkeiten oder die Neutrosphärenmodellierung eine wichtigere Rolle bei der Variation der ZDR spielt, schwer möglich. Durch einen Vergleich der Variationsbereiche dieser beiden Faktoren ist jedoch eindeutig festzustellen, dass die Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung die PZDR-Variation im untersuchten Fallbeispiel ca. zehnmal stärker beeinflusst als die Neutrosphärenmodellierung.

Unter Berücksichtigung aller Untersuchungsergebnisse lassen sich somit alle in der Einleitung angeführten Einflussfaktoren nach ihrer Größenordnung einer Vor- bzw. Nachkommastelle der PZDR-Standardabweichung zuordnen. Unter der Annahme, dass die Standardabweichung von PZDR-Zeitreihen σ_{PZDR} durch eine Vorkommastelle A und drei Nachkommastellen B, C und D mittels

$$\sigma_{PZDR} = \underbrace{A}_{1}, \underbrace{B}_{2}, \underbrace{C}_{3,4}, \underbrace{D}_{5} \quad (4)$$

in der Einheit Millimeter ausgedrückt werden kann, repräsentiert jede Ziffer (1 bis 5) den entsprechenden Einflussfaktor, der diese Stelle der PZDR-Standardabweichung beeinflusst. Die Zuordnung der einzelnen Ziffern zu den Einflussfaktoren lautet:

1. Beobachtungsgewichtung
2. Mehrwegeeinfluss
3. Länge der Basislinie

4. Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung
5. Neutrosphärenmodellierung.

Dieser Reihenfolge wird in der aktuellen Priorisierung der GNSS-Forschungsarbeiten am Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) Rechnung getragen, in denen Anstrengungen unternommen werden, um das stochastische Modell von GNSS-Auswertungen basierend auf Signal-Rausch-Verhältnis-Werten zu verbessern.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Größenordnung der netzspezifischen GNSS-Einflussfaktoren Basislinienlänge sowie Mehrwegebelastung und der von der Auswertestrategie abhängigen Einflussfaktoren Beobachtungsgewichtung, Neutrosphärenmodellierung und Strategie zur Phasenmehrdeutigkeitslösung durch Analyse der Standardabweichungen von abgeleiteten Residuen bestimmt. Die benötigten PZDR wurden durch Konvertierung der DDR unter Anwendung der »zero mean«-Annahme bereitgestellt. Dieser nicht hypothesenfreie Konvertierungsalgorithmus ist vor allem bei extremen Wetterbedingungen oder kleinen Netzausdehnungen kritisch zu hinterfragen, da in solchen Fällen ein der »zero mean«-Annahme entsprechendes Verhalten der Atmosphäre nicht vorausgesetzt werden kann. In Elosegui und Davis (2003) wird das in Alber et al. (2000) vorgestellte, zur Bestimmung der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung in Richtung der Satelliten angewandte Verfahren basierend auf Simulationsergebnissen kritisch untersucht. Demnach liefert dieser Konvertierungsalgorithmus für den im Rahmen der Arbeit ebenfalls untersuchten Teilaspekt der neutrosphärischen Modellbildung nur PZDR, die ZDR entsprechen, wenn das Verhalten der Atmosphäre der im Rahmen der GNSS-Auswertung angehaltenen Neutrosphäre entspricht. Daher erscheint die Verwendung dieses Verfahrens nur für eine große Netzausdehnung (~100 km)

empfehlenswert. Weiterhin wird empfohlen vor der Anwendung eine statistische Untersuchung der DDR durchzuführen.

Die beschriebenen Untersuchungsergebnisse zeigen, dass den beiden Einflussfaktoren elevationsabhängige Beobachtungsgewichtung und Mehrwegeinflüsse in den PZDR-Standardabweichungen eine dominierende Rolle zukommt. Sie beeinflussen die Vor- und die erste Nachkommastelle der in der Einheit Millimeter dargestellten Standardabweichung der PZDR. Daher sind diese beiden Faktoren bei der Messung bzw. bei der Auswertung besonders zu berücksichtigen. Im Gegensatz dazu spielen die Strategien zur Phasenmehrdeutigkeitslösung und die Neutrosphärenmodellierung eine untergeordnete Rolle. Die Größenordnung des Einflusses der Basislinienlänge ist vergleichend zur Stärke der Mehrwegelastung unter anderem auf Grund der Individualität der Mehrwegeinflüsse nur schwer bestimmbar.

Des Weiteren bewegen sich im untersuchten Anwendungsfall die konvertierten PZDR in einem Wertebereich von wenigen Millimetern, die Größenordnung der Effekte verschiedener Einflussfaktoren liegt jedoch unter einem Millimeter. Dies ist auf die geeigneten funktionalen und stochastischen Modelle bei der GNSS-Auswertung, die gute Stationsqualität des SAPOS®-Netzes und das in der Regel ruhige atmosphärische Verhalten im Untersuchungszeitraum zurückzuführen. Weicht die zu untersuchende Situation von den oben beschriebenen ab, sind größere Zahlenwerte der PZDR und der Effekte verschiedener Einflussfaktoren zu erwarten.

Die hier präsentierten Ergebnisse und die getroffenen Aussagen beziehen sich auf die Standardabweichungen von PZDR-Zeitreihen, die unter Zwangsbedingungen aus DDR-Zeitreihen abgeleitet wurden. Unter anderen zu analysierenden Aspekten (z.B. Standardabweichungen der geschätzten stationsspezifischen Neutrosphärenparameter) sind Variationen der Reihenfolge der hier untersuchten Einflussfaktoren in Gl. (4) vorstellbar.

Zur Evaluierung des Einflusses und der Repräsentativität der getroffenen Annahmen (z.B. »zero mean«-Annahme) werden aktuell Untersuchungen basierend auf Auswertansätzen, die die Bestimmung von hochpräzisen Einzelpunktkoordinaten erlauben, durchgeführt.

Dank

Die Autoren danken dem Referat 31 des Landesvermessungsamts Baden-Württemberg für die Bereitstellung der GNSS-Daten sowie der Antennenkalibrierwerte.

Des Weiteren danken die Autoren einem anonymen Reviewer für wichtige Anmerkungen, die interessante neue Gesichtspunkte aufwarfen.

Literatur

- Alber, C., Ware, R., Rocken, C., Braun, J.: Obtaining single path phase delays from GPS double differences. *Geophysical Research Letter* 27, S. 2661–2664, 2000.
- Braun, J., Rocken, C.: Comparisons of Line-of-Sight Water Vapor Observations Using the Global Positioning System and a Pointing Microwave Radiometer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Volume 20, GPS Research Group, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Boulder, Colorado, 2002.
- Elosegui, P., Davis, J.: Accuracy assessment of GPS slant-path determinations. *Proceedings of the International Workshop on GPS Meteorology*, Tsukuba, Japan, 14.–17. Jan. 2003 (Hrsg.: Iwabuchi, T., Shoji, Y.), 2004. Quelle: http://cfa-www.harvard.edu/~space_geodesy/ATMSD/Publications/atmsd_gpsmet03.pdf
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., Collins, J.: *Global positioning system. Theory and practice*, 5. überarbeitete Auflage, Springer, Wien, 2001.
- Howind, J.: *Analyse des stochastischen Modells von GPS-Trägerphasenbeobachtungen*. Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508, München, 2005.
- Hugentobler, U., Dach, R., Fridez, P., Meindl, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*, Buchdruckerei der Universität Bern, Schweiz, 2005.
- Luo, X., Mayer, M., Heck, B.: Bestimmung von hochauflösenden Wasserdampffeldern unter Berücksichtigung von GNSS-Doppeldifferenzresiduen. *Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik*, Universität Karlsruhe, Heft-Nr. 2007/2, 2007. Quelle: www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/203/
- Mayer, M., Wanninger, L., Dick, H.-G., Derenbach, H., Heck, B.: Mehrwegeinflüsse auf den SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs, Poster, *Geodätische Woche 2004*, Stuttgart 12.10.–15.10., 2004. Quelle: 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 Geodesique* 48, 105: S. 279–298, 106: S. 383–397, 49, 107: S. 13–34, 1973.
- SAPOS® Informationen: Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Quelle: www.lv-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&keyinfo=&os=Win32, 2006.
- Wanninger, L.: *Präzise Positionierung in regionalen GPS-Referenzstationsnetzen*, Deutsche Geodätische Kommission, Reihe C, Heft 508, 2000.
- Wetterzentrale 2006: Quelle: www.wetterzentrale.de/topkarten/tkd-wdar2.htm, 2006.

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