



**Xiaoguang Luo**  
**Michael Mayer**  
**Bernhard Heck**

# Erweiterte Modellbildung zur Erzeugung von hochauflösenden Wasserdampffeldern

## 1 Einleitung

Der atmosphärische Wasserdampf ist ein wichtiger Bestandteil der Lufthülle der Erde und beeinflusst wesentlich Wetter und Klima. Des Weiteren hat Wasserdampf einen Anteil von ca. 60 % am natürlichen Treibhauseffekt und wird als das dominierende Treibhausgas betrachtet (MAHLBERG 2002). Der Wasserdampfgehalt gehört nach KRAUS (2001) zu den atmosphärischen Gasen, die nicht homogen verteilt sind. Die Wasserdampfkonzentration variiert zudem zeitlich und räumlich stark. Die Kenntnis der zeitabhängigen räumlichen Verteilung dieses meteorologischen Parameters ist jedoch grundlegend für meteorologische Aufgaben wie Wettervorhersage oder Klimaforschung, was seine Erfassung beispielsweise mit meteorologischen Standardsensoren (z.B. Radiosondenaufstiege, Wasserdampfadiometer) notwendig macht. Trotzdem stellt der Wasserdampf eine bisher mit ausreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung schwer zu erfassende Komponente der Erdatmosphäre dar.

Unter der Voraussetzung einer geeigneten Analyse der auf die Signallaufzeit einwirkenden neutrosphärischen Faktoren weisen globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) wie GPS, GLONASS und GALILEO ein großes Potenzial auf, die Bestimmung der Wasserdampfkonzentration hinsichtlich der zeitlichen und räumlichen Auflösung zu verbessern und die Schwächen der meteorologischen Standardsensoren (z.B. hohe Kosten, geringe räumliche Auflösung) zu beheben. Im Speziellen zeichnen sich die bestehenden Permanentstationsnetze, beispielsweise des IGS (International GNSS Service), des EUREF (EUropean REference Frame) oder des nationalen Dienstes SA-POS® (Satelliten*positionierungsdienst* der deutschen Landesvermessung), durch eine sehr gute horizontale und zeitliche Auflösung aus und sind ferner im Vergleich zu Sensoren wie Radiosonden oder Wasserdampfadiometer sehr kostengünstig.

Die Ermittlung des hochvariablen atmosphärischen Wasserdampfs unter Verwendung von satellitengeodätischen Beobachtungen (z.B. GPS) wurde erstmalig vor ca. 15 Jahren in die Praxis umgesetzt und als wirtschaftliche Alternative zu meteorologischen Standardsensoren erkannt (BEVIS et al. 1992). Mit zunehmender Systemgenauigkeit und -zuverlässigkeit von GNSS und der Verbesserung der Auswertelgorithmen gewann und gewinnt diese Technik insbesondere in den Bereichen Meteorologie und Klimatologie immer mehr an Bedeutung.

Im Folgenden wird die Realisierung eines erweiterten Ansatzes zur Beschreibung der Verteilung des integrierten

Wasserdampfgehalts basierend auf einer dreiteiligen neutrosphärischen Modellbildung unter Verwendung eines planaren Einschichtmodells am Beispiel von GPS-Beobachtungen Baden-Württembergischer Stationen des SA-POS®-Netzes im Zeitraum DOY2004: 186–193 vorgestellt.

## 2 Einfluss der Neutrosphäre auf die Ausbreitung von GNSS-Signalen

Die Erdatmosphäre lässt sich nach dem Ionisierungsgrad in Ionosphäre und Neutrosphäre gliedern. Die Neutrosphäre subsummiert die Tropo-, die Strato- und Teile der Mesosphäre. Sie erstreckt sich vom Boden bis in etwa 80 km Höhe und ist elektrisch neutral. Die Neutrosphäre wirkt auf GNSS-Signale durch die Beeinflussung der Ausbreitungsgeschwindigkeit (Laufzeitverzögerung), der Ausbreitungsrichtung sowie der Signalstärke ein; dabei stellt die variable Laufzeitverzögerung den dominierenden Einflussfaktor dar. Die gesamte zenitale neutrosphärische Laufzeitverzögerung beträgt auf Meeresebene ca. 8 ns, dies entspricht einer Längenänderung der zu einem GPS-Satelliten gemessenen Strecke von ca. 2,3 m. Diese Werte nehmen zum lokalen Horizont hin rasch zu. Da sich die GNSS-Signale in einem inhomogenen Medium ausbreiten, ergibt sich nach dem Prinzip von Snellius ein gekrümmter Signalweg. Die Signalkrümmung wird im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchung vernachlässigt. Die die Signalstärke verschlechternde Absorption führt zu einer gänzlichen oder teilweisen Umwandlung der Signalenergie beispielsweise in Wärme. Detaillierte Informationen zum Einfluss der Neutrosphäre sind SPILKER (1996) zu entnehmen.

Die dominierenden, auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von GNSS-Signalen einwirkenden Neutrosphäreneinflüsse können nach HOPFIELD (1969) in eine trockene und eine komplementäre feuchte Komponente zerlegt werden. Die trockene Komponente beträgt etwa 90 % der gesamten neutrosphärischen Laufzeitverzögerung und kann durch repräsentative Messungen des Oberflächendrucks ausreichend genau bestimmt werden, da die Durchmischung der trockenen Luft als nahezu konstant erachtet werden kann (ASKNE und NORDIUS 1987). Der kleinere Beitrag der feuchten atmosphärischen Bestandteile zum gesamten Neutrosphäreneinfluss enthält jedoch wertvolle Informationen über die Wasserdampfverteilung und ist auf Grund der variablen Wasserdampfkonzentration mittels GNSS-Beobachtungen schwierig zu modellieren.

### 3 Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts durch GNSS-Auswertungen

Der permanente Betrieb von GNSS-Stationen, die einfache Verfügbarkeit und die automatisierbare Verarbeitung der GNSS-Daten führen dazu, dass die Ermittlung von atmosphärischen Parametern (z.B. Wasserdampf) basierend auf satellitengeodätischen Beobachtungen in unterschiedlichen Fachdisziplinen (z.B. Meteorologie, Geodäsie) mit verschiedenen Intentionen vorangetrieben wird. Als grundlegende, repräsentative Literatur im Kontext der Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfgehaltes aus GNSS-Beobachtungen seien BEVIS et al. (1992), ROCKEN et al. (1993), BEVIS et al. (1994) und BUSINGER et al. (1996) genannt.

In der Fachliteratur sind verschiedene Ansätze zur Ermittlung des atmosphärischen Wasserdampfgehalts zu finden, die sich unter anderem hinsichtlich der Aktualität (Real-Time, Near-Real-Time, Post-Processing), des realisierten funktionalen Ansatzes (z.B. Nutzung von Code- bzw. Phasenbeobachtungen), der verwendeten geodätischen Beobachtungsverfahren (z.B. GPS, VLBI) oder durch die Nutzung von meteorologischer Zusatzinformation unterscheiden. Aktuelle Informationen und Ergebnisse hierzu sind beispielsweise auf den Internetseiten des GeoForschungs-Zentrums Potsdam ([http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/gasp1/index\\_GASP1.html](http://www.gfz-potsdam.de/pb1/pg1/gasp1/index_GASP1.html)) und des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie (<http://igs.bkg.bund.de/>) zu finden.

Im Rahmen dieser Grundlagenstudie werden zeitintensive Auswertungen im Post-Processing-Modus basierend auf Doppeldifferenzen von GPS-Phasenmessungen durchgeführt, wobei keine meteorologischen Beobachtungen einbezogen werden; statt dessen wird die Standardatmosphäre (ESSA/NASA/USAF 1966) bezogen auf Meeresniveau ( $h_0 = 0$  km) mit Lufttemperatur  $T$ , Luftdruck  $p$  und relativer Luftfeuchtigkeit  $rh$  (relative humidity) verwendet; siehe Gleichung (1).

$$\begin{aligned} T_0 &= 18^\circ\text{C} \\ p_0 &= 1013,25 \text{ hPa} \\ rh_0 &= 50\% \end{aligned} \quad (1)$$

Zur Extrapolation dieser Parameter für eine beliebige Station  $S$  werden die in Gleichung (2) enthaltenen funktionalen Zusammenhänge genutzt; siehe hierzu BERG (1948).

$$\begin{aligned} T_S[\text{K}] &= T_0[\text{K}] - 6,5(h_S[\text{km}] - h_0[\text{km}])[\text{K}] \\ p_S[\text{hPa}] &= p_0[\text{hPa}](1 - 0,0226(h_S[\text{km}] - h_0[\text{km}]))^{5,225} \\ rh_S[\%] &= rh_0[\%]e^{0,6396(h_S[\text{km}] - h_0[\text{km}])} \end{aligned} \quad (2)$$

Standardatmosphären schaffen somit eine Beziehung zwischen Stationshöhe und dem mittleren Zustand der Erdatmosphäre und stellen mittlere Informationen hinsichtlich Aufbau, Struktur und Eigenschaften der Erdatmosphäre bereit; siehe hierzu KRAUS (2001).

#### 3.1 Größen zur Quantifizierung des Wasserdampfgehalts

Der vom feuchten Neutrosphäreneinfluss abhängige atmosphärische Wasserdampfgehalt lässt sich prinzipiell

durch zwei ineinander überführbare integrierte Größen beschreiben: Das Integrated Precipitable Water ( $IPW$ ) und das Integrated Slant Water ( $ISW$ ).  $IPW$  gibt die gesamte Wasserdampfmenge in Zenitrichtung als Säulenhöhe von kondensiertem Wasser in der Einheit Millimeter an.  $IPW$ -Werte können aktuell aus der im Rahmen einer GNSS-Auswertung angewandten neutrosphärischen Modellbildung mit Millimetergenauigkeit abgeleitet werden; siehe hierzu beispielsweise ELGERED et al. (2005).  $ISW$  entspricht hingegen der integrierten kondensierten Wassermenge entlang dem schrägen Ausbreitungsweg zwischen einem Satelliten und einer Empfangsstation. Im Vergleich zu zenitalen  $IPW$ -Werten enthält das  $ISW$  zusätzliche Informationen über die räumliche Verteilung des integrierten Wasserdampfs.

#### 3.2 Dreiteilige neutrosphärische Modellierung

Bei herkömmlicher funktionaler GNSS-Modellbildung wird der zenitale Einfluss der Neutrosphäre beispielsweise mittels Prädiktionsmodellen (z.B. Saastamoinen-Modell (Saastamoinen 1973)) und auf der Basis von aus GNSS-Beobachtungen zeitabhängig und stationsspezifisch geschätzten zenitalen neutrosphärischen Zusatzparametern zweiteilig modelliert. Elevationsabhängige Abbildungsfunktionen (mapping functions, z.B. Niell-Mapping-Funktion,  $MF_{Niell}$  (NIELL 1996)) ermöglichen die Umrechnung von zenitalen neutrosphärischen Laufzeitverzögerungen in beliebige Richtungen und umgekehrt. Eine Zusammenstellung zur zweiteiligen neutrosphärischen Modellbildung basierend auf differenziellen GNSS-Beobachtungen ist beispielsweise KLEIJER (2004) zu entnehmen.

Durch Prädiktionsmodelle werden Modellwerte der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung in Abhängigkeit von meteorologischen Parametern wie z.B. Lufttemperatur, Luftdruck und relativer Luftfeuchtigkeit sowie unter Berücksichtigung des Messzeitpunktes, der Stationsposition (Lage, Höhe) und der Beobachtungsrichtung (z.B. Elevationswinkel) durch in der Regel empirisch gewonnene funktionale Zusammenhänge vorhergesagt. Werte für die oben genannten meteorologischen Parameter können z.B. durch meteorologische Sensoren erhalten werden. Liegen keine instrumentell bestimmten oder lediglich nicht-repräsentative meteorologische Parameter vor, werden im Allgemeinen Beträge basierend auf Standardatmosphären verwendet.

Im Gegensatz zur Prädiktion des Verhaltens der Atmosphäre werden zenitale stationsspezifische neutrosphärische Parameter (SSNP) im Rahmen der GNSS-Auswertung durch einen Ausgleichsprozess als Verbesserungen für die berechneten prädierten Modellwerte mit einer vorgegebenen Stochastik und mit beschränkter zeitlicher Gültigkeit geschätzt. Sie stellen somit eine Verbesserung des a priori unbekanntes Verhaltens der Atmosphäre dar, welches durch Prädiktionsmodelle nur genähert bestimmbar ist.

Diese aus Prädiktionsmodell und SSNP bestehende, zweiteilige Modellbildung erfolgt in der Regel unabhängig von der azimutalen Richtung, unter der die Satellitensignale

die Station erreichen; die azimuthalen Richtungen werden somit stationsweise isotrop behandelt.

Die Bestimmung von horizontalen neutrosphärischen Gradienten, die einer Verkippung des neutrosphärischen Zenits gegenüber dem lokalen topozentrischen Zenit entsprechen, soll im Rahmen dieses Beitrags unberücksichtigt bleiben, da eine zuverlässige Bestimmung dieser Zusatzparameter lediglich in regionalen oder globalen Netzen und für niedrige Minimalelevationen gewährleistet werden kann (CHEN und HERRING 1997).

Bei einer zweiteiligen funktionalen Modellbildung bleiben die Residuen der verarbeiteten Doppeldifferenzen unberücksichtigt, obwohl sie nicht modellierte Restanteile des neutrosphärischen Einflusses enthalten können. Zur Berücksichtigung dieser residualen Anteile bezüglich eines Signalwegs sind Doppeldifferenzresiduen (DDR) jedoch nicht geeignet, weil insgesamt vier Signalwege zwischen zwei Satelliten und zwei Stationen zu einem Doppeldifferenzresiduum beitragen. Um Informationen für einen Signalweg erhalten zu können, werden im Rahmen dieser Fallstudie DDR nach dem in ALBER et al. (2000) vorgestellten Verfahren mittels zusätzlicher Restriktionen weiter verarbeitet. Die aus DDR abgeleiteten Größen werden als Pseudo-Residuen bezeichnet, da sie nicht notwendigerweise den Residuen undifferenzierter Beobachtungen entsprechen. Z.B. werden gemeinsame Anteile der originären GNSS-Beobachtungen durch Differenzierungstechniken eliminiert, sodass diese nicht mehr vollständig restituierbar sind.

Unter sogenannten „zero mean“-Annahmen erfolgt die Konvertierung von DDR in PZDR (Pseudo-Zerodifferenzresiduen) über PSDR (Pseudo-Singledifferenzresiduen) in zwei Schritten. Die Konvertierung von DDR in PSDR wird für eine Basislinie unter Verwendung mehrerer Satelliten epochenweise durchgeführt, während PSDR ebenfalls epochenweise satellitenbezogen in PZDR konvertiert werden. PZDR liefern Aussagen für den Signalweg zwischen einer Station und einem Satelliten. An dieser Stelle wird auf eine ausführliche Beschreibung des Konvertierungsprozesses und der damit verbundenen Annahmen und Einschränkungen verzichtet. Detaillierte Erläuterungen zum Konvertierungsprinzip sowie Untersuchungen zur numerischen Stabilität basierend auf den hier verwendeten GPS-Daten sind LUO et al. (2007a) und LUO et al. (2007b) zu entnehmen. In ELOSEGUI und DAVIS (2003) wird das in ALBER et al. (2000) vorgestellte und für diese Fallstudie grundlegende Verfahren zur Bestimmung von neutrosphärischen Laufzeitverzögerungen in Richtung der Satelliten basierend auf Simulationen kritisch untersucht. Demnach liefert dieser Konvertierungsalgorithmus nur PZDR, die ZDR entsprechen, wenn das atmosphärische Verhalten mittels des im Rahmen der GNSS-Auswertung verwendeten parametrischen Modells exakt beschrieben werden kann. Daher erscheint die Verwendung dieses Verfahrens nur für große Netzausdehnungen ( $\sim 100$  km) empfehlenswert.

Prinzipiell können in den DDR residuale Restanteile weiterer Einflussfaktoren (z.B. Mehrwegeeffekte, Antennenphasenzentrumsvariationen (PCV)) enthalten sein, sie werden im Rahmen dieser Grundlagenstudie jedoch vernachlässigt.

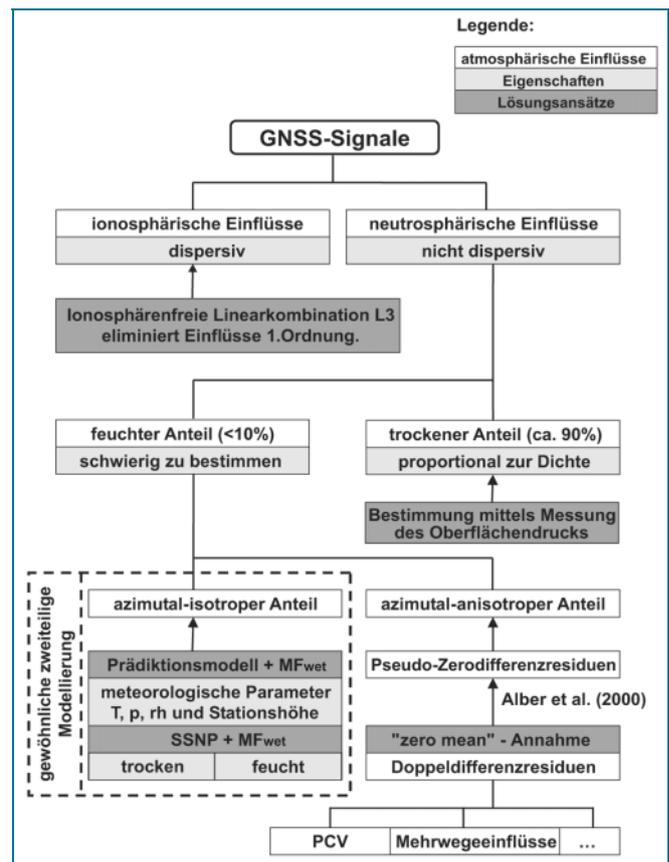


Abb. 1: Atmosphärische Einflüsse auf GNSS-Signale und ihre Modellierung

Die der Datenverarbeitung zu Grunde liegende Einteilung der atmosphärischen Einflüsse auf GNSS-Signale und deren Handhabung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt.

## 4 GNSS-Datengrundlage

Für eine beispielhaft durchgeführte GNSS-Auswertung wurden die Beobachtungsdaten aller 16 Stationen des SAPOS<sup>®</sup>-Netzes Baden-Württembergs im Zeitraum DOY2004: 186–193 herangezogen. Diese Daten stehen mit einer Taktrate von 15 s und mit einem minimalen Elevationswinkel von  $0^\circ$  zur Verfügung.

Auf dem Hintergrund der in MAYER et al. (2004) beschriebenen Untersuchungen zur Quantifizierung der Mehrwegeeinflüsse der SAPOS<sup>®</sup>-Stationen Baden-Württembergs können alle berücksichtigten Stationen hinsichtlich der Mehrwegebelastung klassifiziert und in drei Gruppen (Mehrwegebelastung: stark/mittel/gering) eingeteilt werden; siehe hierzu Abbildung 2 und Tabelle 1.

Eine Berücksichtigung der Mehrwegesituation ist unter anderem deshalb sinnvoll, da diese quasi-periodischen Fehlereinflüsse zu einer Verschlechterung der Signalqualität führen, was wiederum einen direkten Einfluss auf die durch das stochastische Ausgleichsmodell festgelegte Genauigkeitssituation der GNSS-Auswertung hat. Des Weiteren besteht nach BEUTLER (1998) eine Korrelation zwischen der geschätzten Stationshöhe und der neutro-

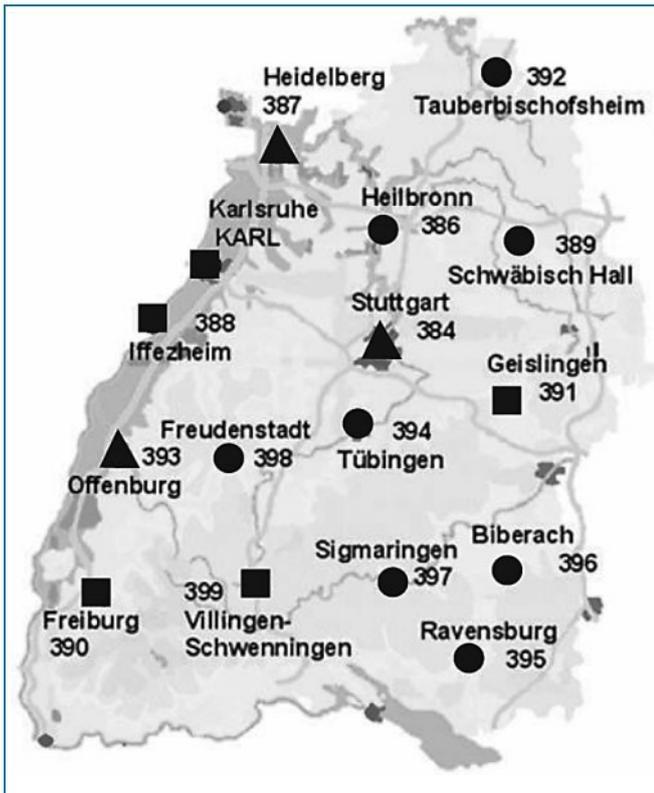


Abb. 2: SAPOS®-Stationen Baden-Württembergs (SAPOS® Informationen 2006); Dreieck/Rechteck/Kreis: starke/mittlere/geringe Mehrwegeeinflüsse nach MAYER et al. (2004)

sphärischen Modellbildung; hierbei sind insbesondere die im Folgenden analysierten zenitalen stationsspezifischen Zusatzparameter zu nennen, wodurch fehlerhaft ge-

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

schätzte Stationshöhen auf neutrosphärische Produkte einwirken und umgekehrt.

Für die GNSS-Auswertung wird deshalb die Station Tübingen (TUEB), die sich im Vergleich zu anderen Stationen durch eine sehr geringe Mehrwegebelastung auszeichnet, als Referenzstation ausgewählt. Zu dieser Station werden von den übrigen Netzstationen Basislinien gebildet und verarbeitet. Des Weiteren liegt TUEB in der Mitte des SAPOS®-Netzes, wodurch eine günstige Netzgeometrie beispielsweise hinsichtlich der Basislinienlänge erzielt werden kann. Die Datenauswertung wird unter Anwendung der wissenschaftlichen Auswertesoftware Bernese GPS Software V5.0 (BS5) durchgeführt. Details zur BS5 sind DACH et al. (2007) zu entnehmen. In Tabelle 1 sind alle Stationen und deren Abkürzungen sowie der Abstand zur Referenzstation TUEB zusammengestellt. Ausgewählte wichtige Charakteristika der Datenprozessierung sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

## 5 Neutrosphärische Modellbildung im Fallbeispiel

Im Rahmen der überbestimmten Auswertung von statischen GNSS-Beobachtungen wird im hier behandelten Fallbeispiel das Prädiktionsmodell von Saastamoinen verwendet, welches basierend auf der Annahme, die Neutrosphäre werde hinreichend genau durch die Standardatmosphäre beschrieben, in Abhängigkeit von der genäherten Stationsposition und der Zenitdistanz den neutrosphärischen Einfluss approximiert. Dieses Modell stellt den ersten, über den gesamten Beobachtungszeitraum stationenweise konstanten Anteil der Gesamtsumme der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung dar. Der zweite Anteil ist durch die Verbesserungen des Prädiktionsmodells gegeben, die mittels der oben genannten zenitalen, zeitabhängig und stückweise konstanten SSNP stationenweise bestimmt werden. Diese beiden Teilkomponenten liegen für jede verarbeitete Basislinienstation im gesamten Beobachtungszeitraum vor; für die Referenzstation TUEB mehrmals. Zur Ermittlung einer Strategie zur Bestimmung von repräsentativen SSNP der Referenzstation TUEB wurden von LUO et al. (2007a) ausgewählte GNSS-Einflussfaktoren (z.B. Mehrwegeeffekte, Basislinienlänge) beispielsweise basierend auf SSNP-Standardabweichungen validiert. Vor allem bei langen Beobachtungszeiten dominiert die Abhängigkeit der Ergebnisse von der Basislinienlänge gegenüber der Auswirkungen von Mehrwegeeffekten, deshalb erscheint für die Referenzstation TUEB eine Mittelbildung der SSNP aller Basislinien sinnvoll.

SSNP weisen eine beschränkte zeitliche Gültigkeit  $t_G$  auf. Im Rahmen des vorliegenden Fallbeispiels wird  $t_G$  zu 2 h gewählt. Für einen Beobachtungstag werden pro Station  $(24/t_G + 1)$  SSNP bestimmt, wobei der letzte Parameter eine Prädiktion für das Verhalten der neutrosphärischen Zusatzparameter darstellt. Falls keine Datenlücke vorliegt, werden im Fallbeispiel somit insgesamt 13 Parameter für jede Station an jedem Tag geschätzt.

Zur Gewährleistung einer bestmöglichen zeitlichen Auflösung für die neutrosphärische Information, die die



Tab. 2: Parametereinstellungen der Datenprozessierung unter Verwendung der BS5

Parameter	Charakteristik
Auswertegröße	Phasenbeobachtung; Doppeldifferenz
Abtastrate	180 Sekunden
Stochastisches Modell	Elevationsabhängige Gewichtung ( $\cos^2 z$ )
Minimaler Elevationswinkel	10°
Orbits und Erdrotationsparameter	präzise IGS-Information
Stationskoordinaten	Tübingen als Referenzstation (fixiert)
Neutrosphärisches Prädiktionsmodell	Saastamoinen-Modell
Abbildungsfunktion	Niell <sub>wet</sub> (1996)
Gültigkeit neutrosphärischer Zusatzparameter	2 Stunden
Phasenmehrdeutigkeitslösung	SIGMA-Strategie (L5 und L3)
Antennenkorrektur	Absolute Kalibrierwerte

Grundlage für die Bestimmung von Werten des atmosphärischen Wasserdampfs bildet, und zur Überführung des wenig realitätsnahen, unstetigen Verlaufs der SSNP werden die stückweise konstanten SSNP weiterverarbeitet. Wird jeder Tag unabhängig vom vorhergehenden und vom nachfolgenden betrachtet, so kann – lückenlose GNSS-Beobachtungen vorausgesetzt und unter der Annahme, SSNP-Werte seien repräsentativ für die zeitlichen, sich in Abhängigkeit von  $t_G$  ergebenden Intervallmitten (Fallbeispiel: 1 Uhr, 3 Uhr, 5 Uhr, ...) – im Zeitfenster zwischen 1 und 24 Uhr interpoliert werden. Zwischen 0 und 1 Uhr wird jedoch eine Extrapolation notwendig; siehe hierzu Abbildung 3. Um für einen stetigen Verlauf der stückweise konstanten Zusatzparameter zu sorgen, wurden Spline-Ansätze sowie lineare Inter- bzw. Extrapolationsalgorithmen untersucht. Die Verfahren unterscheiden sich in den Interpolationsbereichen im Allgemeinen nur marginal, lediglich wenn konsekutive SSNP sehr kleine Änderungen aufweisen, was einer ruhigen und stabilen

Neutrosphäre entspricht, sind schwach signifikante Unterschiede zu detektieren; siehe z.B. Zeitfenster 18–22 Uhr in Abbildung 3. In den Extrapolationsbereichen liefert das kubische Spline-Verfahren im Gegensatz zum Linearverfahren große und unrealistische Werte. Aus diesem Grund erscheint das Linearverfahren zur Inter- bzw. Extrapolation von SSNP besser geeignet und wird im weiteren Verlauf angewandt.

Werden für einzelne Stationen Datenlücken detektiert, so werden für die betreffende Station im korrespondierenden Zeitraum keine SSNP geschätzt. In Abbildung 3 ist exemplarisch für die Station FREI an DOY2004: 187 ein Tagesverlauf mit Datenlücke dargestellt. Zwischen 0 und 4 Uhr können die SSNP auf Grund einer Beobachtungslücke nicht geschätzt werden. In solchen Fällen wird die entsprechende Station bei der im Folgenden beschriebenen Visualisierung des Wasserdampffeldes nicht berücksichtigt.

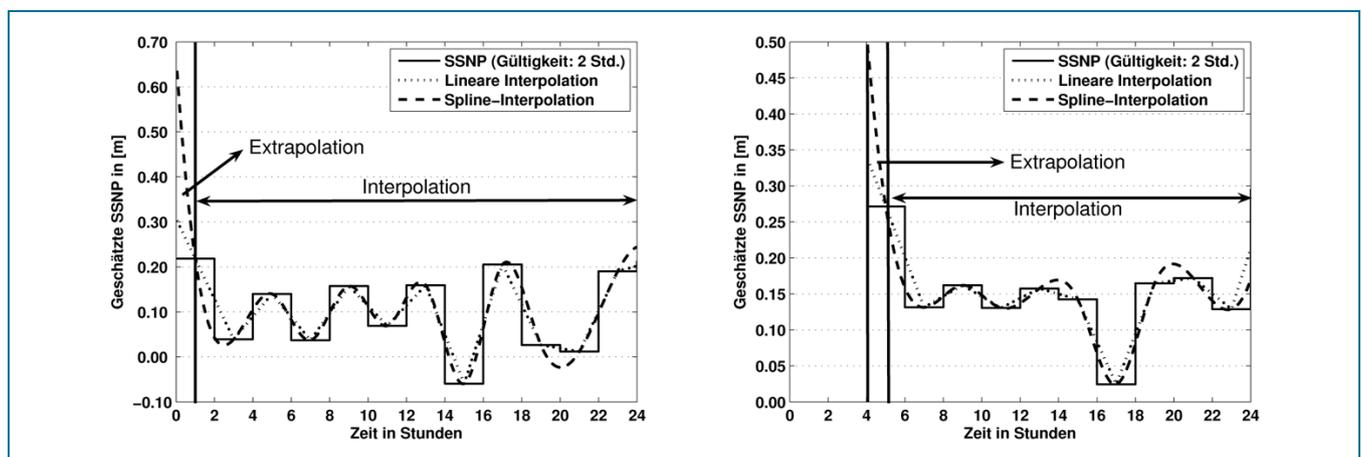


Abb. 3: Glättung der SSNP durch Inter- bzw. Extrapolation; links: DOY2004: 186, Station HLBR; keine Datenlücke, rechts: DOY2004: 187, Station FREI; Datenlücke: 0–4 Uhr

## 6 Erzeugung von Wasserdampffeldern

Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird erläutert, wie – ausgehend von einer dreiteiligen neutrosphärischen Modellbildung – Wasserdampffelder generiert werden können, die räumlich und zeitlich hochaufgelöste Aussagen bezüglich der integrierten Wasserdampfverteilung ermöglichen.

Im Vergleich zu anderen Ansätzen (z.B. REIGBER et al. 2004), welche routinemäßig in Near-Real-Time basierend auf GNSS-Auswertungen Wasserdampffelder ermitteln und dazu eine zweiteilige Modellbildung verwenden, die lediglich zenitale, stationsabhängige Informationen berücksichtigt, kann durch eine dreiteilige Modellbildung zusätzlich dem residualen neutrosphärischen Anteil, der Informationen entlang des schrägen, vom Satelliten zur Beobachtungsstation zurückgelegten Signalwegs enthält, Rechnung getragen werden.

Da 99 % des gesamten Wasserdampfgehalts der Atmosphäre in der erdnächsten Atmosphärenschicht – der Troposphäre – enthalten sind, wird eine planare Kartenebene zur Visualisierung der Wasserdampfverteilung in einer Höhe von 10 km über der als ruhend angenommenen Meeresoberfläche festgelegt. Diese Höhe entspricht in etwa der mittleren Höhe der Tropopause in mittleren Breiten. Die SAPOS®-Stationen sind durch ihre Gauß-Krüger-Koordinaten (GK-Koordinaten), die beispielsweise basierend auf den durch die GNSS-Auswertung ermittelten dreidimensionalen kartesischen Koordinaten ( $x, y, z$ ) über geographische Koordinaten ( $\lambda, \varphi$ ) und ellipsoidische Höhen  $h$  berechnet werden können, in der Kartenebene eindeutig festgelegt.

In Abhängigkeit von den Elevationswinkeln und den Azimuten der Satelliten können die GK-Koordinaten der Durchstoßpunkte der GNSS-Signale unter Berücksichtigung der Stationshöhe in der Kartenebene berechnet werden. Dabei ist zu beachten, dass sich die Azimute der Satelliten auf die astronomische Nordrichtung beziehen, während die Richtungswinkel in GK-Koordinaten bezüglich Gitternord definiert sind. Die beiden Nordrichtungen unterscheiden sich auf Grund der Meridiankonvergenz und des längenabhängigen Anteils der Lotabweichung. Dabei kommt der Lotabweichung im Vergleich zur Meridiankonvergenz eine untergeordnete Rolle zu, weshalb die Lotabweichung im Fallbeispiel vernachlässigt wird. Die maximale Meridiankonvergenz beträgt im Anwendungsfall ca.  $0.9^\circ$  und wird bei der Bestimmung der Richtungswinkel der Satelliten berücksichtigt.

Der basierend auf einer dreiteiligen neutrosphärischen Modellierung berechenbare – nicht notwendiger Weise in zenitaler Richtung verlaufende – feuchte Anteil der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung  $SWD$  (Slant Wet Delay) wird unter Anwendung des Umrechnungsfaktors  $\Pi$

$$\Pi = \frac{10^6}{R_w \left( \frac{k_3}{T_m} + k_2 - k_1 \frac{R_d}{r_w} \right)}, ISW = \Pi \cdot SWD \quad (3)$$

in  $ISW$ -Werte umgerechnet.  $\Pi$  hängt von den spezifischen Gaskonstanten der trockenen bzw. der feuchten Luft ( $R_d$  bzw.  $R_w$ ), der mittleren atmosphärischen Temperatur  $T_m$  sowie den empirischen Konstanten  $k_i$  (Rueger<sub>best</sub>-Modell

nach RUEGER (2002)) ab. Theoretisch ist die mittlere atmosphärische Temperatur als eine Funktion des Wasserdampfdrucks  $e$  [hPa], der Temperatur  $T$  [K] und des Realgasfaktors  $Z_w$  durch

$$T_m = \frac{\int \frac{e}{T Z_w} dH}{\int \frac{e}{T^2 Z_w} dH} \quad (4)$$

in Abhängigkeit von der Höhe  $H$  definiert (DAVIS et al. 1985). OWENS (1967) sind die empirischen funktionalen Zusammenhänge zur Berechnung von  $Z_w$  zu entnehmen. In der Praxis wird jedoch häufig

$$T_m[\text{K}] = 70,2 + 0,72 \cdot T_S[\text{K}] \quad (5)$$

zur Berechnung der mittleren atmosphärischen Temperatur in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur  $T_S$  verwendet (BEVIS et al. 1992). Gleichung (5) wurde auf Basis von mehr als 8500 Radiosondenprofilen (Zeitbasis: 2 Jahre) für den nordamerikanischen Bereich (13 Stationen,  $\varphi \in [27^\circ \text{ n. Br.}, 65^\circ \text{ n. Br.}]$ ,  $h \in [0 \text{ km}, 1,6 \text{ km}]$ ) mit einem relativen Fehler von weniger als 2 % bestimmt.

Um dem mit zunehmender Stationshöhe exponentiell abnehmendem Wasserdampfgehalt im Rahmen der Koordinierung in der Kartenebene Rechnung zu tragen, werden die aus der neutrosphärischen Laufzeitverzögerung abgeleiteten  $ISW$ -Werte in Relation zum Massenmittelpunkt der feuchten Atmosphäre gesetzt, was eine repräsentative Koordinierung der längs des Ausbreitungsweges ermittelten  $ISW$ -Werte ermöglicht. Der Partialdruck des Wasserdampfs  $e$  [hPa] wird hierzu als Parameter verwendet und mittels

$$e = \left( \frac{rh}{100} \right) e^{-37,2465 + 0,2131665 \cdot T - 0,000256908 \cdot T^2} \quad (6)$$

basierend auf  $T$  [K] und  $rh$  [%] berechnet. Im Speziellen wird die sogenannte Halbwertsbreite des Wasserdampfdrucks bzw. die korrespondierende stationsbezogene Höhe  $h_m$  zur Bestimmung der Massenmittelpunkte herangezogen. Hierzu wird zunächst der Wasserdampfdruck  $e_s$  für die Stationshöhe  $H_s$  unter Verwendung von Gleichung (6) berechnet und halbiert. Dieser Wert entspricht einer Höhe  $H_m$ , die sich auf Grund der Verwendung der mit den Gleichungen (1) und (2) gegebenen Standardatmosphäre auf die Meeresoberfläche bezieht. Die Differenz zwischen  $H_m$  und  $H_s$  ist identisch mit der gesuchten Höhe  $h_m$  (Abbildung 4).  $h_m$  ist stationsabhängig und nimmt mit zunehmender Stationshöhe ab. Die  $h_m$ -Werte unterscheiden sich im Fallbeispiel trotz maximaler Höhenunterschiede der Stationen von ca. 620 m um maximal 10 m und liegen in einer Höhe von ca. 650 m. Zur Bestimmung der Positionen aller Projektionspunkte der Massenmittelpunkte wird  $h_m$  mit 650 m als konstant festgelegt. Für die Visualisierung der Wasserdampfverteilung werden  $IPW$ -Werte verwendet, die den Projektionspunkten der Massenmittelpunkte zugeordnet werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Berechnung von  $IPW$ -Werten in drei Schritten.

Im ersten Schritt wird angenommen, dass die geschätzten SSNP sowohl einen trockenen als auch einen feuchten Anteil enthalten und der prozentuale Betrag  $G$  des feuchten Anteils der SSNP mit dem des Prädiktionsmodells

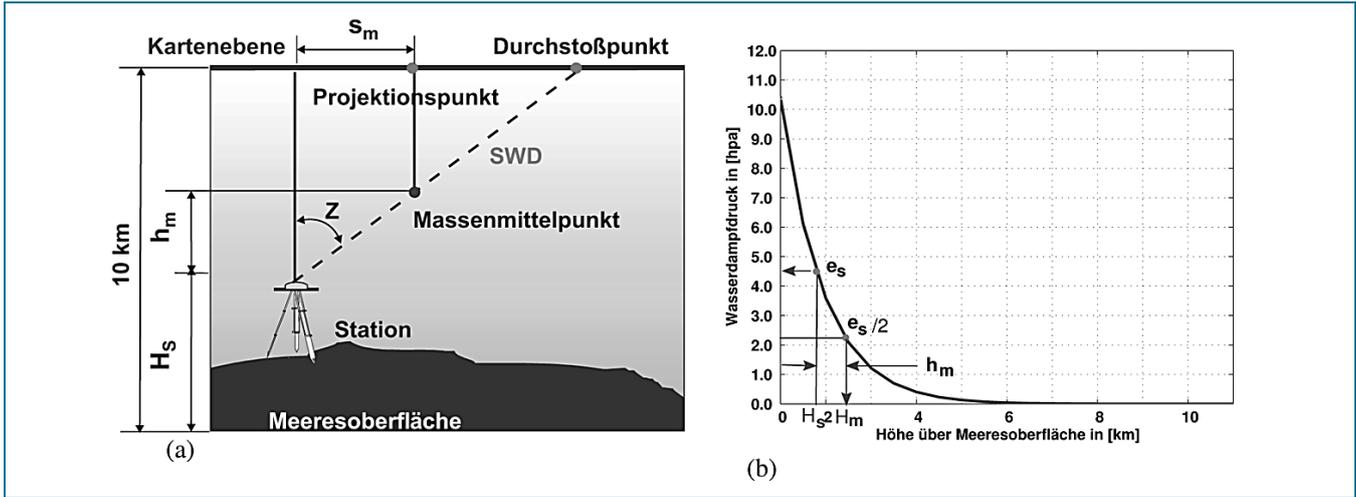


Abb. 4: Ermittlung der stationsbezogenen Höhe  $h_m$  mittels Halbwertsbreite des Wasserdampfdrucks  
 (a) Projektion des Massenmittelpunkts in die Kartenebene  
 (b) Höhenabhängigkeit des Wasserdampfdrucks

(hier Saastamoinen-Modell) identisch ist. In Abhängigkeit von  $G$  ergibt sich der Slant Wet Delay zwischen dem Satelliten  $SV$  und der Empfangsstation  $R$  mittels Gleichung (7), wobei  $MF_{Niell,wet}$  die Mapping-Funktion von NIELL (1996) mit den für den feuchten Atmosphärenanteil gültigen Parametern  $A$ ,  $B$ ,  $C$  bezeichnet.

Anschließend erfolgt zur Beseitigung der Elevationsabhängigkeit von  $SWD$  bzw.  $ISW$  die Division von Gleichung (7) durch die Abbildungsfunktion  $MF_{Niell,wet}$ , woraus der Zenith Wet Delay ( $ZWD$ ) resultiert; siehe Gleichung (8).

Die abschließende Umrechnung von  $ZWD$  in  $IPW$  erfolgt mittels des dimensionslosen Faktors  $\Pi$  (Gleichung (3)). 6,5 mm der feuchten zenitalen Laufzeitverzögerung entsprechen in der Regel ca. 1 mm  $IPW$ . Die berechneten  $IPW$ -Werte können nunmehr den Projektionspunkten

der Massenmittelpunkte in der Kartenebene zugeordnet werden.

Auf Grund der relativ geringen stationsbezogenen Halbwertsbreiten  $h_m$  (650 m) gegenüber der Höhe der Kartenebene (10 km über der Meeresoberfläche) liegen die Projektionspunkte der Massenmittelpunkte sehr nahe bei den einzelnen Stationen; siehe Abbildung 5.

Gestützt auf die ermittelten Projektionspunkte lassen sich durch zweidimensionale Interpolation (Gitterabstand: 1 km)  $IPW$ -Werte bestimmen. Somit können Wasserdampfkarten mit einer hohen zeitlichen Auflösung (Maximum/Abtastrate: 3 min; Standard: 30 min) sowie einer gesteigerten räumlichen Auflösung basierend auf einer großen Stützstellenanzahl (ca. 130 anstatt 16) erzeugt werden. Die Ermittlung der zeitlich schlechter aufgelösten Standard-Wasserdampfkarten erfolgt durch Mittelbil-

$$SWD = \underbrace{MF_{Niell,wet} \cdot \Delta\rho_{Saas,wet}^0}_{\text{Prädikationsmodell}} + \underbrace{MF_{Niell,wet} \cdot SSNP_{ges} \cdot G}_{\text{Zusatzparameter}} + \underbrace{PZDR_R^{SV}}_{\text{Pseudo-Residuen}}$$

azimutal-isotrop                      Restanteile (azimutal-anisotrop)

$$\text{mit } \Delta\rho_{Saas,wet}^0 [\text{m}] = 0.002277D \left( \frac{1255}{T_s} + 0,205471 \right) e_s \quad (7)$$

$$\text{und } MF_{Niell,wet}(E) = \frac{1 + \frac{A}{1 + \frac{B}{1 + C}}}{\sin E + \frac{A}{\sin E + \frac{B}{\sin E + C}}}$$

$$ZWD = \frac{SWD}{MF_{Niell,wet}} = \Delta\rho_{Saas,wet}^0 + SSNP_{ges} \cdot G + \frac{ZDR_R^{SV}}{MF_{Niell,wet}}, \quad IPW = \Pi \cdot ZWD \quad (8)$$

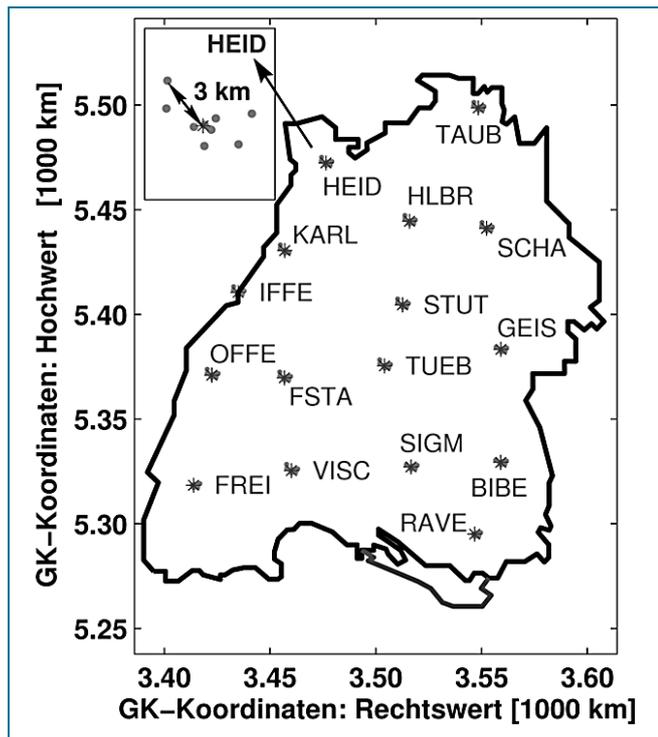


Abb. 5: Projektionspunkte der GNSS-Signale (Massenmittelpunkte) in der Kartenebene; Epoche: 001, DOY2004: 186

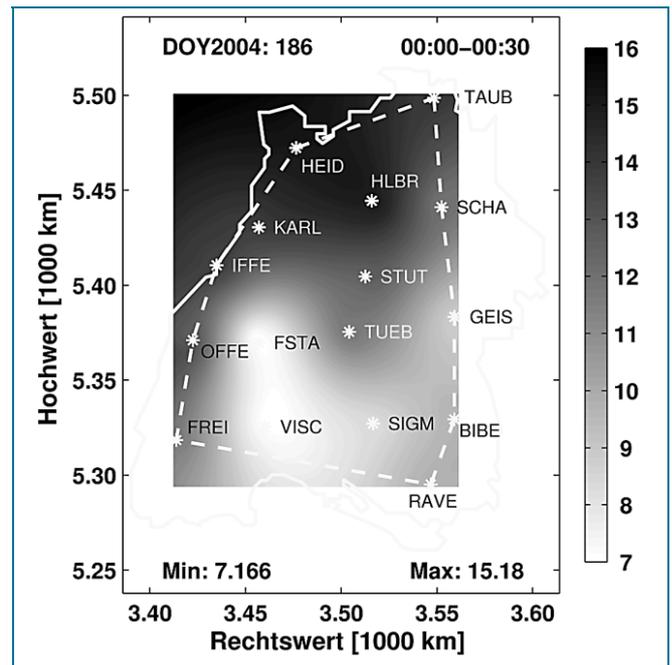


Abb. 6: Wasserdampfkarte (IPW in [mm]) für das Zeitintervall 0:00-0:30, DOY2004: 186; gestrichelte Linie: Gültigkeitsbereich

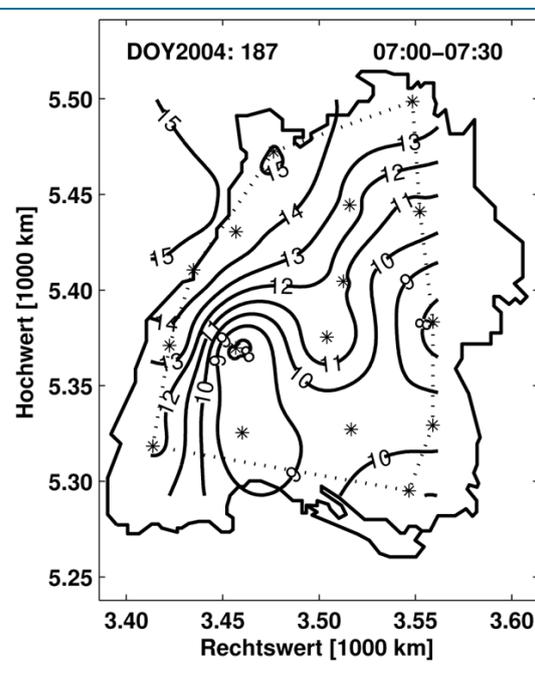
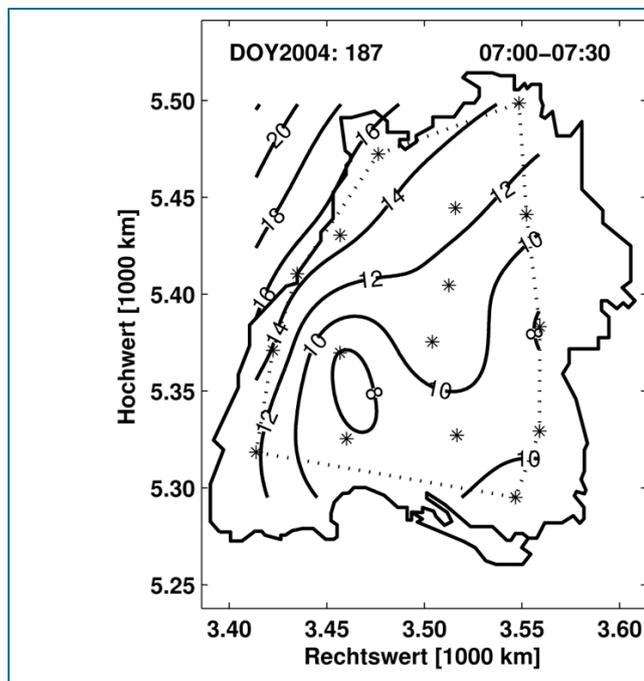


Abb. 7: Vergleich der IPW-Isolinien [mm] der zwei- (links) und der dreiteiligen (rechts) neutrosphärischen Modellbildung; Zeitraum: DOY2004: 187, Zeitintervall: 07:00-07:30 Uhr

derung der 3-Minuten-Ergebnisse. Aus den einzelnen erzeugten Wasserdampfkarten können anschließend Animationen generiert werden, welche die zeitlichen Variationen der Wasserdampfverteilung veranschaulichen. In Abbildung 6 wird ein Beispiel der Visualisierungsergebnisse mit einer zeitlichen Auflösung von 30 min dargestellt. Da im Zuge der Berechnung der IPW-Werte Extra-

polationen über die Gebietsgrenzen hinaus zugelassen wurden, stellen die gestrichelten Linien eine Gültigkeitsgrenze der Ergebnisse dar. Die kondensierte Wasserdampfmenge in Zenitrichtung nimmt an diesem Tag Werte zwischen ca. 7 und 16 mm an. Die Größe der IPW hängt dabei hauptsächlich von der Stationshöhe ab. Je höher die Station liegt, desto dünner ist die darüber liegende Atmo-

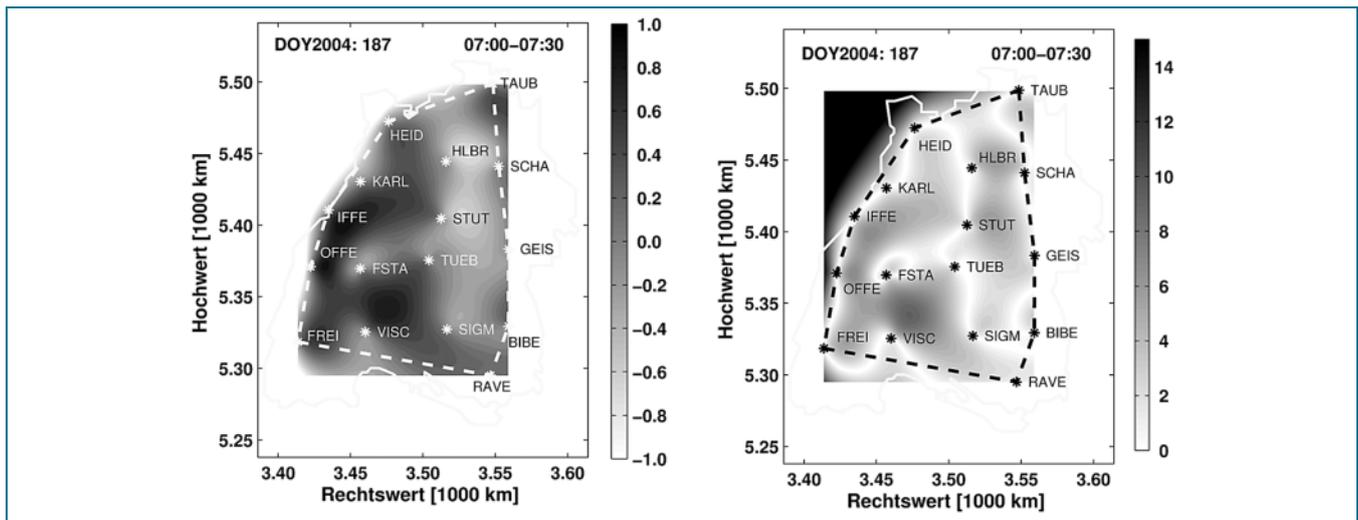


Abb. 8: Vergleich der drei- (M3) und der zweiteiligen (M2) neutrosphärischen Modellbildung; Zeitraum: DOY2004: 187, Zeitintervall: 07:00–07:30 Uhr; links: absolute IPW-Differenz (M3-M2) [mm], rechts: relative IPW-Differenz ((M3-M2)/M3) [%]

sphärensicht und umso kleiner sind die *IPW*-Werte. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6 an den nördlichen, im Bereich des Rheingrabens liegenden Stationen bzw. an den südwestlichen Stationen im Schwarzwald deutlich zu erkennen. Die in den Wasserdampfkarten angegebenen minimalen (Min: 7.166) und maximalen Werte (Max: 15.18) beziehen sich auf die berechneten stationsbezogenen *IPW* vor der zweidimensionalen Interpolation und sind in der Einheit Millimeter angegeben.

Zur Dokumentation und Visualisierung des erhöhten räumlichen Detailreichtums der dreiteiligen Modellierung (M3) gegenüber der zweiteiligen Standardmodellierung (M2) werden in Abbildung 7 die Isolinien der Wasserdampffelder beider Modelle für das Zeitintervall 07:00–07:30 Uhr an DOY2004: 187 vergleichend dargestellt. Die Verbesserung der räumlichen Auflösung durch die Verwendung der dreiteiligen Modellierung ist an der Dichte der Isolinien deutlich zu erkennen. Da die Konvertierung von DDR in PZDR sehr rechenintensiv und zeitaufwändig ist, benötigt die automatisierte Datenverarbeitung mehrere Stunden Laufzeit, wohingegen die zweiteilige Modellierung in Near-Real-Time durchgeführt werden kann.

In Abbildung 8 sind die absoluten und prozentualen Differenzen beider Modellierungen (M2, M3) für das selbe Zeitintervall 07:00–07:30 Uhr an DOY2004: 187 dargestellt. Maximale absolute Unterschiede liegen im Bereich von  $-0,4$  mm bis  $+0,8$  mm, was prozentualen Abweichungsbeträgen von knapp 10 % entspricht. Darüber hinaus lässt sich feststellen, dass die größeren Differenzen im südwestlichen Bereich des Darstellungsgebiets zu finden sind.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Diese Arbeit stellt einen Ansatz für eine erweiterte Modellbildung zur zweidimensionalen Visualisierung von Wasserdampffeldern vor. Grundlegend hierbei ist eine

dreiteilige, aus Prädiktionsmodell, Zusatzparametern und Residueninformation bestehende neutrosphärische Modellbildung. Das Prädiktionsmodell (Saastamoinen-Modell) wird unter Annahmen der Standardatmosphäre berechnet. Die stationspezifischen Zusatzparameter werden unter Verwendung der Abbildungsfunktion von Niell geschätzt.

Nach Konvertierung der Doppeldifferenzresiduen in Pseudo-Zerodifferenzresiduen werden daraus wasserdampfabhängige Anteile extrahiert, die bei der Berechnung von *IPW*-Werten berücksichtigt werden. Dieses Verfahren wird auf GPS-Beobachtungen des SAPOS®-Netzes im Bereich von Baden-Württemberg angewandt. Die Verteilung des integrierten atmosphärischen Wasserdampfs kann anschließend unter Anwendung eines planaren Einschichtmodells visualisiert werden. Durch Vergleich der Visualisierungsergebnisse wurde festgestellt, dass die dreiteilige neutrosphärische Modellierung durch Berücksichtigung der Residueninformationen eine verbesserte räumliche und zeitliche Auflösung gegenüber der gewöhnlichen zweiteiligen Modellierung bietet. Beispielsweise ermutigen die Differenzen gegenüber der zweistufigen Modellbildung zu einer Verfeinerung der Auswertestrategie, welche anschließend mittels tomographischen Verfahren, die eine strengere funktionale Modellbildung aufweisen, validiert werden soll.

In dieser Fallstudie wird die Bestimmung von Wasserdampffeldern basierend auf diversen Vereinfachungen und Annahmen lediglich unter Verwendung von GPS-Beobachtungen durchgeführt. In weiteren Untersuchungen sind Verbesserungen bezüglich der GNSS-Modellbildung zwingend notwendig. So muss beispielsweise überprüft werden, inwieweit die Nutzung meteorologischer Daten die Zuverlässigkeit der Ergebnisse steigern kann. Weitere Modellverfeinerungen betreffen die Repräsentativität der beispielsweise zur Berechnung der mittleren atmosphärischen Temperatur  $T_m$  verwendeten empirischen Formeln. Des Weiteren ist die zeitliche Gültigkeit der geschätzten Neutrosphärenparameter basierend auf der Stationsquali-

tät (z.B. Mehrwegebelastung) zu verifizieren und eine geeignete Glättungsfunktion unter Berücksichtigung der Satellitenkonstellation zu finden. Zur Bestimmung des Glättungsintervalls sind weitere Untersuchungen notwendig, da auf Grund der Änderung der Satellitenkonstellation ein großes Glättungsintervall zu Informationsverlust und ein kleines Glättungsintervall zu großem Datenrauschen führen kann. Ebenso erscheint eine Verifikation der Annahme, dass Zusatzparameter sowohl trockene als auch feuchte Anteile enthalten, sinnvoll. Zur Visualisierung von Wasserdampffeldern wurde zudem ein planares Einschichtmodell verwendet, statt dessen kann ein sphärisches Modell zur graphischen Darstellung verwendet werden. Ferner ist der derzeit noch sehr hohe Rechenaufwand (mehrere Stunden Laufzeit für die automatisierte Verarbeitung der SAPOS<sup>®</sup>-Daten Baden-Württembergs) zu verringern. Zudem erscheinen Untersuchungen notwendig, die eine Berücksichtigung aller Fehleranteile der PZDR ermöglichen, um die im Rahmen der vorliegenden Arbeit getroffenen Annahmen anzupassen. Des Weiteren ist das Verfahren nach ALBER et al. (2000) basierend auf hochpräzisen Einzelpunktpositionierungen zu verifizieren. Sind diese Modifikationen und Verbesserungen erfolgreich angebracht, so kann die dreiteilige Modellbildung wirkungsvoll zur Steigerung der Detailfülle im Rahmen der Wettervorhersage, vor allem jedoch in der Klimaforschung, eingesetzt werden.

## Dank

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

## Literatur

- [1] ALBER, C.; WARE, R.; ROCKEN, C.; BRAUN, J.: Obtaining single path phase delays from GPS double differences, *Geophysical Research Letter*, 27, 2000, S. 2661–2664
- [2] ASKNE, J.; NORDIUS, H.: Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, 22, 3/1987, S. 379–386
- [3] BERG, H. (1948): *Allgemeine Meteorologie*. Dümmler Verlag, Bonn
- [4] BEUTLER, G.: The role of GPS in space geodesy. In: Teunissen, P.J.G., Kleusberg, A. (Hrsg.) *GPS for geodesy*. 2. Auflage, Berlin, Springer Verlag, 1998, S. 625–650
- [5] BEVIS, M.; BUSINGER, S.; HERRING, T. A.; ROCKEN, C. R.; ANTHES, R. A.; WARE, R. H.: GPS meteorology: Remote sensing of atmospheric water vapor using the Global Positioning System, *Journal of Geophysical Research*, 97, D14/1992, S. 15 787–15 801
- [6] BEVIS, M.; BUSINGER, S.; CHISWELL, S. R.; HERRING, T. A.; ANTHES, R. A.; ROCKEN, C. R.; WARE, R. H.: GPS meteorology: Mapping zenith wet delays onto precipitable water. *Journal of Applied Meteorology*, 33, 3/1994, S. 379–386
- [7] BUSINGER, S.; CHISWELL, S. R.; BEVIS, M.; DUAN, J.; ANTHES, R.; ROCKEN, C.; WARE, R.; EXNER, T. M.; VAN HOVE, T.; SOLHEIM, F.: The promise of GPS in atmospheric monitoring. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1996, S. 5–18
- [8] CHEN, G.; HERRING, T. A.: Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data. *Journal of Geophysical Research*, 102, B9/1997, S. 20 489–20 502
- [9] DACH, R.; HUGENTOBLE, U.; FRIDEZ, P.; MEINDL, M.: *Bernese GPS Software Version 5.0*. Astronomisches Institut, Universität Bern, Bern, Schweiz, 2007
- [10] DAVIS, J. L.: Atmospheric propagation effects on radio interferometry. *Scientific Report Nr. 1*, Air Force Geophysics Laboratory, AFGL-TR-86-0243
- [11] ELGERED, G.; PLAG, H.-P.; VAN DER MAREL, H.; BARLAG, S.; NASH, J. (Hrsg.): *Exploitation of ground-based GPS for operational numerical weather prediction and climate operations: Final report – COST Action 716*. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, ISBN 92-898-0012-7, 2005, 234 S
- [12] 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](http://cfa-www.harvard.edu/~space_geodesy/ATMSD/Publications/atmsd_gpsmet03.pdf)
- [13] ESSA/NASA/USAF, U.S. standard atmosphere supplements, 1966, Committee on Extension to the Standard Atmosphere, U.S. Government Printing Office, Washington, Washington DC, USA, 1966
- [14] HOPFIELD, H.: Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data, *Journal of Geophysical Research*, 74, 18/1969, S. 4487–4499
- [15] KLEIJER, F.: Tropospheric modeling and filtering für precise leveling. *Publications on Geodesy*, Nr. 56, Netherlands Geodetic Commission, Delft, Niederlande
- [16] KRAUS, H.: *Die Atmosphäre der Erde. Eine Einführung in die Meteorologie*, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2001, 470 S
- [17] 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, 2007a. Quelle: <http://www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/203/>
- [18] LUO, X.; MAYER, M.; HECK, B.: Quantifizierung verschiedener Einflussfaktoren in GNSS-Residuen. *Zeitschrift für Vermessungswesen*, 132, 2007b, S. 97–107
- [19] MAHLBERG, H.: *Meteorologie und Klimatologie*, 4., aktualisierte Auflage, Berlin, Springer-Verlag, 2002, 346 S
- [20] MAYER, M.; WANNINGER, L.; DICK, H.-G.; DERENBACH, H.; HECK, B.: Mehrwegeinflüsse auf den SAPOS<sup>®</sup>-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](https://www.gik.uni-karlsruhe.de/fileadmin/mitarbeiter/mayer/poster_gw2004/poster_gw_2004_mp.pdf)
- [21] NIELL, A. E.: Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths, *Journal of Geophysical Research*, 101, B2/1996, S. 3227–3246
- [22] OWENS, J. C.: Optical refractive index of air: Dependence on pressure, temperature and composition, *Applied Optics*, 6, 1/1967, S. 51–59
- [23] REIGBER, C.; GENDT, G.; WICKERT, J.: GPS Atmosphären-Sondierungs-Projekt (GASP) - Ein innovativer Ansatz zur Bestimmung von Atmosphärenparametern, Abschlussbericht, HGF-Strategiefonds-Projekt GASP – FKZ 01SF9922 des AWI, DLR, GFZ und GKSS, *Scientific Technical Report*, 04/02, 2004

- [24] ROCKEN, C.; WARE, R.; VAN HOVE, T.; SOLHEIM, F.; ALBER, C.; JOHNSON, J.; BEVIS, M.; BUSINGER, S.: Sensing atmospheric water vapor with the Global Positioning System. *Geophysical Research Letters*, 20, 23/1993, S. 2631–2634, 1993
- [25] RUEGER, J. M.: Refractive index formulae for electronic distance measurement with radio and millimetre waves, In: Rueger, J.M. (Hrsg.), *Refractive indices of light, infrared and radio waves in the atmosphere*, UNISURV Report S-68, 2002, S. 1–52
- [26] SAASTAMOINEN, J.: Contributions to the theory of atmospheric refraction, *Bulletin Geodesique*, 48, 1973, S. 279–298, 48, 1973, S. 383–397, 49, 1973, S. 13–34
- [27] SAPOS<sup>®</sup> Informationen: Landesvermessungamt Baden-Württemberg, Quelle: [www.lv-bw.de/lvshop2/start\\_ns.asp?openkey=PRODUKTE&keyinfo=&os=Wi n32](http://www.lv-bw.de/lvshop2/start_ns.asp?openkey=PRODUKTE&keyinfo=&os=Wi n32), 2006
- [28] SPILKER, J. J.: Tropospheric effects on GPS. In: Parkinson, B.W., Spilker Jr., J.J., Axrad, P., Enge, P. (Hrsg.), *Global Positioning System: Theory and applications*. Vol. 1, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, Washington DC, USA, S. 517–546, 1996

Dipl.-Ing. XIAOGUANG LUO, Dr.-Ing. MICHAEL MAYER,  
Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. BERNHARD HECK

Anschrift:

Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH),  
Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe, Tel.: 07 21/6 08-36 68

E-Mail-Adressen: [luo@gik.uni-karlsruhe.de](mailto:luo@gik.uni-karlsruhe.de),

[mmayer@gik.uni-karlsruhe.de](mailto:mmayer@gik.uni-karlsruhe.de),

[heck@gik.uni-karlsruhe.de](mailto:heck@gik.uni-karlsruhe.de)

### Zusammenfassung

Die Erdatmosphäre beeinflusst die Ausbreitung von Signalen globaler Satellitennavigationssysteme. Hierbei werden in der Regel die Auswirkungen von signifikant ionisierten und elektrisch neutralen Atmosphärenbereichen unterschieden. Die Neutrosphäreneinflüsse können jedoch zur Erzeugung von Wasserdampffeldern genutzt werden; unter Anwendung eines planaren Einschichtmodells werden GPS-Beobachtungen aller 16 Baden-Württembergischen Stationen des SAPOS<sup>®</sup>-Netzes im Zeitraum DOY2004: 186–193 unter Verwendung von neutrosphärischen Prädiktionsmodellen, geschätzten stationsspezifischen neutrosphärischen Zusatzparametern und Residuen von Phasenmessungen zu diesem Zweck verarbeitet.

### Schlagworte

GNSS, Residuen, SAPOS<sup>®</sup>, Neutrosphäre, Wasserdampfbestimmung

### Abstract

Signals of global navigation satellite systems are delayed by propagation through the Earth's atmosphere. The delays can be subdivided into ionospheric and neutral atmospheric delay terms. The neutral delays can be used to estimate atmospheric water vapor fields. By means of a so-called planar one-layer model GPS observations from all 16 sites of the SAPOS<sup>®</sup> (Satellite Positioning Service of the German State Survey) network in Baden-Württemberg spanning eight days, DOY2004: 186–193, are processed to generate the water vapor fields based on three components, namely neutral atmospheric prediction model, estimated site specific neutral atmospheric parameter and residuals of phase observations.

### Keywords

GNSS, residuals, SAPOS<sup>®</sup>, neutral atmosphere, water vapor determination