



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



DIPLOMARBEIT

**Vergleich der EOP aus zwei
unterschiedlichen VLBI Netzwerken der
CONT17 Kampagne**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie und Geoinformation

eingereicht von

Yannic Öhlknecht

Matrikelnummer 01325527

ausgeführt im Forschungsbereich Höhere Geodäsie
am Department für Geodäsie und Geoinformation
der Fakultät für Mathematik und Geoinformation der Technischen Universität Wien

Betreuung

Betreuerin: Dipl. Ing. Dr.techn. Sigrid Böhm

Wien, 13. Mai 2020

(Unterschrift Verfasser)

(Unterschrift Betreuerin)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Erklärung zur Verfassung der Arbeit

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen, Karten und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, 13. Mai 2020

Yannic Öhlknecht



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner Diplomarbeit und meines Studiums an der TU Wien unterstützt haben. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Dr. techn. Sigrid Böhm, die immer ein offenes Ohr für mich hatte und mir bei Problemen sofort weiter geholfen hat. Ebenfalls möchte ich mich bei Prof. Johannes Böhm bedanken, der durch seine spannenden Vorlesungen erst mein Interesse an dem Thema der VLBI geweckt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Studienkollegen bedanken, ohne die mein Studium nur halb so viel Spaß gemacht hätte.

Auch möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich beim Korrekturlesen dieser Diplomarbeit unterstützt haben und auch konstruktive Kritik dazu gegeben haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei meiner Familie bedanken, die mich im Laufe meines Studiums stets unterstützt hat und mir das Studieren ermöglicht hat.

Am Meisten möchte ich mich bei meiner Freundin Katharina bedanken. Ohne ihre Unterstützung und immer offenes Ohr für meine Probleme hätte ich es nie so weit geschafft. Sie hat daher maßgeblichen Anteil an meinem Erfolg im Studium.

Yannic Öhlknecht, 13. Mai 2020

We are grateful to all parties that contributed to the success of the CONT17 campaign, in particular to the IVS Coordinating Center at NASA Goddard Space Flight Center (GSFC) for taking the bulk of the organizational load, to the GSFC VLBI group for preparing the legacy S/X observing schedules and MIT Haystack Observatory for the VGOS observing schedules, to the IVS observing stations at Badary and Zelenchukskaya (both Institute for Applied Astronomy, IAA, St. Petersburg, Russia), Fortaleza (Rádio Observatório Espacial do Nordeste, ROEN; Center of Radio Astronomy and Astrophysics, Engineering School, Mackenzie Presbyterian University, Sao Paulo and Brazilian Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brazil), GGAO (MIT Haystack Observatory and NASA GSFC, USA), Hartebeesthoek (Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory, National Research Foundation, South Africa), the AuScope stations of Hobart, Katherine, and Yarragadee (Geoscience Australia, University of Tasmania), Ishioka (Geospatial Information Authority of Japan), Kashima (National Institute of Information and Communications Technology, Japan), Kokee Park (U.S. Naval Observatory and NASA GSFC, USA), Matera (Agenzia Spaziale Italiana, Italy), Medicina (Istituto di Radioastronomia, Italy), Ny Ålesund (Kartverket, Norway), Onsala (Onsala Space Observatory, Chalmers University of Technology, Sweden), Seshan (Shanghai Astronomical Observatory, China), Warkworth (Auckland University of Technology, New Zealand), Westford (MIT Haystack Observatory), Wettzell (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie and Technische Universität München, Germany), and Yebes (Instituto Geográfico Nacional, Spain) plus the Very Long Baseline Array (VLBA) stations of the Long Baseline Observatory (LBO) for carrying out the observations under the US Naval Observatory's time allocation, to the staff at the MPIfR/BKG correlator center, the VLBA correlator at Socorro, and the MIT Haystack Observatory correlator for performing the correlations and the fringe fitting of the data, and to the IVS Data Centers at BKG (Leipzig, Germany), Observatoire de Paris (France), and NASA CDDIS (Greenbelt, MD, USA) for the central data holds.

Kurzfassung

Die *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) ist das einzige geodätische Welt- raumverfahren, das den vollständigen Satz der fünf Erdorientierungsparameter (EOP; Polbewegung, dUT1 und *celestial pole offsets* - CPO) durch die Beobach- tung von extragalaktischen Radioquellen (Quasaren) bestimmen kann. Diese fünf EOP werden für die Transformation zwischen erdfesten Koordinatenrahmen (TRF) und himmelfesten Koordinatenrahmen (CRF) benötigt. Aufgrund der fehlenden Alternativen für die Bestimmung aller fünf EOP zusammen, ist es von enormer Wichtigkeit diese mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Die Sensitivität auf die EOP hängt unter anderem von der Geometrie der Verteilung der VLBI Antennen ab. Daher ist die Wahl des Beobachtungsnetzwerkes ein zu beachtender Aspekt.

Die EOP werden in dieser Diplomarbeit mit den Daten der CONT17 Beobachtungs- kampagne bestimmt und analysiert. Das Besondere dieser Kampagne ist die Beob- achtung mit zwei unabhängigen Beobachtungsnetzwerken (XA und XB), die sich aufgrund der geographischen Verteilung der Beobachtungsstationen unterscheiden. Das Ziel dieser Arbeit ist es, anhand der Beobachtungsdaten dieser zwei Netzwerke, die EOP zu bestimmen, hinsichtlich ihrer Genauigkeit zu untersuchen und die Ab- weichungen der EOP aus XA und XB (Biases) darzulegen. Es werden verschiedene Auswertungsstrategien angewandt, um ein bestmögliches Ergebnis zu erzielen.

Mit der *single session* Lösung ergeben sich teils sehr große Offsets mit bis zu $\sim 240 \mu\text{s}$ zwischen den beiden Netzwerken, die sich durch den Ausschluss der Station HOBART26 von einem Beobachtungstag verringern lassen. In dieser Arbeit wer- den verschiedene Methoden zur Verbesserung der Übereinstimmung angewandt, wie z.B. das Schätzen des feuchten Anteils der Troposphäre in einem geringeren Inter- vall, oder das Festsetzen der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte. Generell bekommt man mit der Einzellösung sowohl größere formale Fehler als auch größere Biases aller fünf EOP. Mit dem Schätzen der EOP in einer globalen Lösung kann beides verkleinert werden. Die resultierenden mittleren Abweichungen liegen im Be- reich von $\sim 125 \mu\text{s}(\pm)$ für dUT1 und die Polkoordinaten und bei $\sim 40 \mu\text{s}$ für die CPO. Die Standardabweichungen der EOP Differenzen bewegen sich zwischen 60 und $100 \mu\text{s}$. Das Schätzen der EOP in einem stündlichen, statt in einem täg- lichen Intervall, verschlechtert zwar die Genauigkeit, bringt aber eine höhere zeitliche Auflösung der EOP. Es lässt sich aufgrund der Ergebnisse allgemein eine gute Ab- hängigkeit der Biases und der formalen Fehler der EOP von der unterschiedlichen Verteilung der VLBI Stationen erkennen. Mit den Aussagen von zwei vorhergehen- den Arbeiten, die ebenfalls die Daten der CONT17 Kampagne analysieren, wird eine gute Übereinstimmung gefunden. Das XB-Netzwerk ist aufgrund der besseren Nord- Süd Ausdehnung deutlich sensitiver auf die Polparameter als das XA-Netzwerk. Für den Parameter dUT1 bzw. LoD ist aufgrund der besseren Ost-West Ausdehnung das XA-Netzwerk sensitiver. Dies zeigt sich insbesondere im Vergleich mit einer Lösung aus den Daten von globalen Satellitennavigationssystemen (GNSS).

Abstract

The *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) is the only space geodetic technique, which can determine the full set of the five Earth Orientation Parameters (EOP; polar motion, dUT1 and *celestial polar offsets* - CPO) by observing extragalactic radio sources (quasars). These five EOP are needed for the transformation between the terrestrial reference frame (TRF) and the celestial reference frame (CRF). Due to the lack of alternatives for the estimation of all five EOP together, it is necessary to provide them with the highest accuracy. The sensitivity for the EOP depends on the network geometry of the VLBI antennas. Therefore the selection of the observation network is an aspect to be considered.

In this diploma thesis, the EOP are determined and analyzed using the data from the CONT17 observation campaign. The special feature of this campaign is the observation with two independent networks (XA and XB), which differ due to their geographical distribution of the telescopes. The aim of this thesis is to estimate the EOP, investigate their accuracy and to identify biases between these two CONT17 networks. Various analysis strategies are used to achieve the best possible result.

In the single session solution, considerable offsets up to $\sim 240 \mu\text{as}$ are found between the two networks, which can be reduced by excluding the antenna HOBART26 from one observation day. Various methods are used to improve the agreement, e.g. estimation of the zenith wet delay with a shorter interval, or by fixing the nutation parameters to their *a priori* values. In the single session solution larger formal errors together with larger biases of all five EOP are estimated. Both can be reduced by estimating the EOP in a global solution. The resulting offsets are in the range of $\sim 125 \mu\text{as}(\pm)$ for dUT1 and polar motion and $\sim 40 \mu\text{as}$ for the CPO. The standard deviations of the EOP differences are between 60 to $100 \mu\text{as}$. Hourly estimation of the EOP degrades the precision, but the temporal resolution is improved. By estimating the EOP hourly, instead daily, the accuracy is worsen. However the temporal resolution of the EOP gets better. Based on the results a clear dependency of the biases and the formal errors on the global network distribution can be found. A good agreement with the statements of two previous papers analyzing the CONT17 data is seen. The XB-network is more sensitive to polar motion than the XA-network, due to its better north-south extension. The XA-network has a larger sensitivity to the dUT1 or LoD value due to its better east-west expansion. This is especially seen by comparing to a solution based on data from global navigation satellite systems (GNSS).

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
2 Theoretischer Hintergrund	5
2.1 VLBI	5
2.1.1 Messprinzip VLBI	5
2.1.2 Beobachtungsgleichung	7
2.1.3 Theoretisches Delay Modell	8
2.1.3.1 Stationskoordinaten	9
2.1.3.2 Erdorientierung	10
2.1.3.3 Verzögerung in der Atmosphäre	13
2.1.4 Parameterschätzung	16
2.1.5 Globale Lösung	18
2.2 Vienna VLBI Software - VieVS	19
2.2.1 Vie_INIT	19
2.2.2 Vie_MOD	20
2.2.3 Vie_LSM	20
2.2.4 Vie_SCHED	21
2.2.5 Vie_SIM	21
2.2.6 Vie_GLOB	21
3 Continuous VLBI Campaign 2017	23
3.1 Allgemeines	23
3.2 Legacy -1 und -2 Netzwerk	24
3.3 VLBI Global Observing System (VGOS) Netzwerk	25
3.4 Erwartete Genauigkeit	27
4 Auswertung	29
4.1 Single Session	29
4.1.1 Standardparameter	29
4.1.2 Ausschluss von Stationen	32
4.1.3 Troposphäre	33
4.1.4 Nutation fixiert	34
4.2 Globale Lösung	34
4.3 Vergleich der EOP von beiden Netzwerke	36
4.4 Zusammenhang Stationskoordinaten mit EOP	37

5	Ergebnisse	39
5.1	Single Sessions	39
5.1.1	Standardparameter	39
5.1.2	Ausschließen von Stationen	40
5.1.2.1	HOBART26	41
5.1.2.2	KASHIM11	42
5.1.2.3	ZELENCHK	44
5.1.3	Troposphäre	45
5.1.4	Nutation fixiert	45
5.2	Globale Lösung	46
5.3	Biases der Netzwerke	49
5.3.1	Single Sessions	49
5.3.1.1	Biases Standardparameter	49
5.3.1.2	Biases ohne HOBART26	51
5.3.1.3	Biases Troposphäre	53
5.3.1.4	Biases ohne Nutation	55
5.3.1.5	Vergleich der Biases der Single Sessions	57
5.3.2	Globale Lösung	58
5.3.2.1	Biases der globalen Lösung	60
5.3.2.2	Biases der globalen Lösung mit Nutation fixiert	60
5.3.2.3	Biases ERP 60 Minuten	63
5.3.2.4	Vergleich der Biases der globalen Lösung	64
5.4	Zusammenhang der Stationskoordinaten mit EOP	65
6	Diskussion und Vergleich der Ergebnisse	69
6.1	Diskussion	69
6.2	Vergleich der Ergebnisse	74
6.2.1	Erwartete Genauigkeit	74
6.2.2	Vergleich mit zwei ausgewählten Publikationen	75
6.2.2.1	Vergleich mit Böhm, S. et al. (2019)	75
6.2.2.2	Vergleich mit Nilsson et al. (2019)	75
7	Fazit und Ausblick	79
	Tabellenverzeichnis	81
	Abbildungsverzeichnis	83
	Literaturverzeichnis	85

Kapitel 1

Einleitung

Um den terrestrischen mit dem himmelfesten Referenzrahmen zu verbinden, werden eine Reihe von Parametern benötigt, um die Position der Rotationsachse der Erde im Raum zu bestimmen. Diese Parameter werden Erdorientierungsparameter (EOP) genannt und bestehen aus der Bewegung der Rotationsachse der Erde im erdfesten Referenzsystem (Polbewegung), der Bewegung der Rotationsachse in Bezug auf ein himmelfestes Koordinatensystem (Präzession/Nutation) und dem verbindenden Element der beiden Achsen, dem Erdrotationswinkel (meist angegeben als Abweichung der Weltzeit von der Atomzeit: $dUT1=UT1-UTC$) (Bizouard und Gambis, 2009; Petit und Luzum, 2010; Landskron und Böhm, J., 2019).

Die *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) ist das einzige Verfahren, das den vollständigen Satz der EOP bestimmen kann. Andere geodätische Weltraumverfahren, die Satellitenbeobachtungen verwenden, können nur die beiden Polparameter und die zeitliche Ableitung von $dUT1$ bestimmen. Die Satellitenbahnen korrelieren sehr stark mit den Nutationsparametern und dem $dUT1$ Parameter, daher ist es nicht möglich, diese Werte zu bestimmen (Schmidt et al., 2010). Dies verdeutlicht wiederum die Wichtigkeit von VLBI Messungen aufgrund der fehlenden Alternativen zur Bestimmung aller fünf EOP. Deswegen ist es äußerst wichtig, die Erdorientierungsparameter mit höchster Genauigkeit zu bestimmen. Zusätzlich ist die VLBI unter anderem in der Lage, zur Realisierung und Bestimmung des internationalen terrestrischen (ITRF) und internationalen himmelfesten Referenzrahmens (ICRF) beizutragen (Böhm, J. und Schuh, 2013).

Mit den Daten einer fünfzehntägigen Beobachtungskampagne sollen die Erdorientierungsparameter von zwei unabhängigen Netzwerken bestimmt werden. Bei der Kampagne handelt es sich um die *Continuous VLBI Campaign 2017* (Behrend et al., 2017), die im November und Dezember 2017 stattgefunden hat. Es werden die beiden berechneten Lösungen der Parameter miteinander verglichen und hinsichtlich ihrer Genauigkeit analysiert. Des Weiteren soll herausgefunden werden, ob bei der Bestimmung der EOP durch die beiden Netzwerke systematische Abweichungen¹ der beiden Lösungen auftreten. Wenn Biases zwischen den Netzwerken auftreten, sollen diese möglichst gering gehalten werden. Zusätzlich wird die Genauigkeit der Berechnung (formale Fehler) bestimmt und untersucht. Es sollen im Zuge der Arbeit

¹engl. Bias

mehrere Methoden der Auswertung durchgeführt und miteinander verglichen werden. Die Analyse soll mit dem MATLAB basierten an der TU-Wien, Department für Geodäsie und Geoinformation, entwickelten Programm VieVS (*Vienna VLBI and Satellite Software*, Böhm, J. et al. (2018), durchgeführt werden.

In der Veröffentlichung über die Organisation der CONT17 Kampagne von Behrend et al. (2017) wird auch eine erwartbare Genauigkeit in Form von formalen Fehlern der Erdorientierungsparameter angegeben.

Bereits durchgeführte Studien zur CONT17 Kampagne bestehen unter anderem aus den Veröffentlichungen von Böhm, S. et al. (2019), Landskron und Böhm, J. (2019) und Nilsson et al. (2019). Landskron und Böhm, J. (2019) untersuchen die mögliche Verbesserung des dUT1 Parameters aus VLBI *Intensive Sessions* durch verschiedene Ansätze zur Modellierung der troposphärischen Laufzeitverzögerung. Hochgenaue Schätzwerte von dUT1 aus der CONT17 Kampagne dienen dabei als Referenz.

Böhm, S. et al. (2019) behandeln die Genauigkeit der Erdrotationsparameter (Polbewegung und dUT1) bei Vereinigung von VLBI Beobachtungen mit den Messungen eines Ringlasers Gyroskopes in Wettzell. Als Referenzdaten für die Untersuchung der Genauigkeit der Kombination werden die Daten der CONT17 Kampagne herangezogen. Aufgrund dessen stehen für diese Diplomarbeit Vergleichswerte bezüglich der Genauigkeit der Schätzungen von drei der fünf Erdorientierungsparameter der CONT17 Kampagne zur Verfügung. Als Genauigkeiten werden der Mittelwert und das quadratische Mittel sowohl von den Zuschlägen zu den *a priori* Erdrotationsparametern der beiden Netzwerke als auch von der Differenz der beiden Netzwerke angegeben.

Die Veröffentlichung von Nilsson et al. (2019) bearbeitet das gewichtete quadratische Mittel der Differenzen der berechneten EOP von beiden Netzwerken der CONT17 Kampagne. Außerdem werden die berechneten Parameter noch mit Referenzwerten aus der IGS (*International GNSS Service*) final solution von GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Messungen verglichen.

Publikationen zu früheren CONT Kampagnen bestehen unter anderem aus Nilsson et al. (2014), Haas et al. (2017), MacMillan (2017) und Karbon et al. (2017). Nilsson et al. (2014) untersuchen die Genauigkeit der Erdorientierungsparameter der CONT11 Kampagne. Ein Vergleich der *ultra rapid operation* auf den dUT1 Wert von der CONT11 und CONT14 Kampagne wurde von Haas et al. (2017) durchgeführt. MacMillan (2017) stellt die EOP und den Maßstab verschiedener CONT Kampagnen (2002-2014) einander gegenüber auf. Karbon et al. (2017) behandeln den Einfluss von zwei verschiedenen Auswertungsmethoden, die Methode der kleinsten Quadrate und den Kalman Filter, auf die Genauigkeit der Erdorientierungsparameter anhand der Daten der CONT14 Kampagne.

Zum besseren Verständnis des technischen Hintergrundes wird in Kapitel 2 auf das Grundprinzip der VLBI Messung eingegangen. Es wird auf das Messprinzip der VLBI (Abschnitt 2.1.1), die Beobachtungsgleichung der VLBI, das theoretische *Delay Model* (Abschnitt 2.1.3), auf die Parameterschätzung (Abschnitt 2.1.4) der VLBI Beobachtungen und die globale Lösung (Abschnitt 2.1.5) eingegangen. Außerdem wird das verwendete Programm der Auswertung VieVS in Abschnitt 2.2 näher erklärt. Das Kapitel 3 beschäftigt sich mit dem verwendeten Datensatz die-

ser Diplomarbeit, der CONT17 Kampagne. In Kapitel 4 werden die verschiedenen Auswertungsmethoden beschrieben und in Kapitel 5 die dazugehörigen Ergebnisse analysiert und beschrieben. Zum Schluss werden in Kapitel 6 die Ergebnisse aus Kapitel 5 diskutiert. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 ein Vergleich, der in dieser Arbeit berechneten Zuschläge zu den *a priori* Erdorientierungsparametern zu denen aus der Literatur zu erwartbaren Genauigkeiten der CONT17 Kampagne sowie zu Studien mit realen Werten der CONT17 Kampagne. Im letzten Kapitel 7 werden die wichtigsten Punkte zusammengefasst.

Kapitel 2

Theoretischer Hintergrund

Das Verfahren der *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) ist seit den 1970er Jahren ein wichtiges geodätisches Weltraumverfahren. Mit diesem kann man einerseits die zeitlich veränderlichen Erdorientierungsparameter (EOP) sehr genau bestimmen, andererseits auch den terrestrischen Referenzrahmen (*International Terrestrial Reference Frame, ITRF*) und den himmelfesten Referenzrahmen (*International Celestial Reference Frame (ICRF)*) bestimmen und fortführen. Der ITRF wird durch die sehr genaue Messung von Stationskoordinaten und deren Geschwindigkeiten definiert, der ICRF durch die Messung von extragalaktischen Radioquellen (Quasare). Als einziges geodätisches Weltraumverfahren ist die VLBI in der Lage, alle fünf Erdorientierungsparameter zu bestimmen (Schlüter und Behrend, 2007; Schuh und Behrend, 2011).

Im Folgenden wird auf den technischen Hintergrund der VLBI (Abschnitt 2.1) sowie auf die Auswertungssoftware VieVS (Abschnitt 2.2) näher eingegangen.

2.1 VLBI

2.1.1 Messprinzip VLBI

Das Grundprinzip der VLBI beruht auf der emittierten Strahlung von extragalaktischen Radioquellen. Diese werden auf der Erde in einfachster Form von zwei Radioteleskopen mit dem bis zu mehreren tausend Kilometer langen Basislängenvektor \vec{b} empfangen (Campbell, 2000). Da Quasare sehr weit von der Erde entfernt liegen, ist das empfangene Signal an den Teleskopen eine ebene und keine gebogene Welle und die beiden Richtungsvektoren \vec{k}_0 zur Radioquelle sind parallel (Abb. 2.1).

Um den Zeitunterschied τ in der Ankunftszeit der ebenen Welle an den beiden Teleskopen t_1 und t_2 zu bestimmen, muss das Skalarprodukt des Basislinienvektors \vec{b} und des Richtungsvektors \vec{k}_0 noch durch die Lichtgeschwindigkeit c^1 dividiert werden (Gleichung (2.1)) (Schuh und Behrend, 2011).

$$\tau = -\frac{\vec{b} \cdot \vec{k}_0}{c} = t_2 - t_1 \quad (2.1)$$

¹Lichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458$ m/s ≈ 1 mm/3 ps

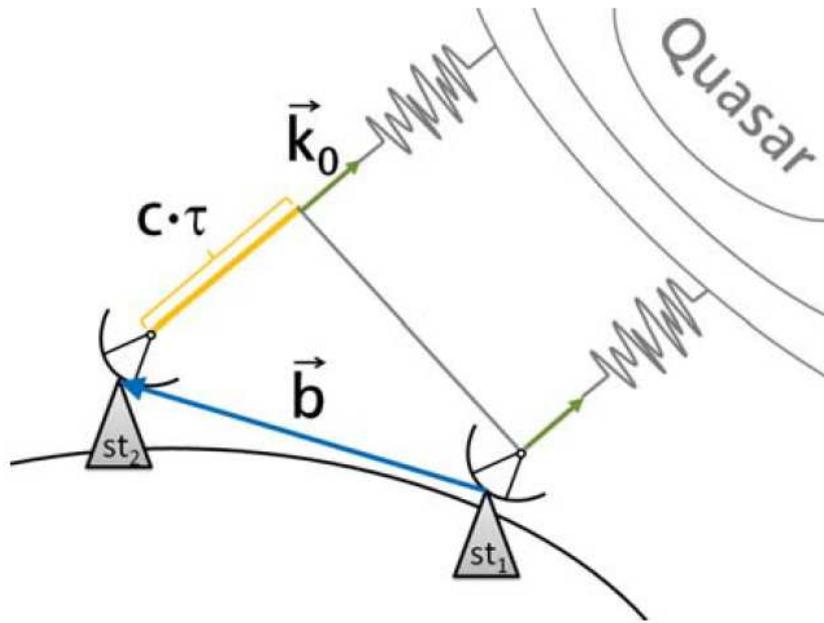


Abbildung 2.1: Geometrisches Prinzip der VLBI Messung (Plank, 2013)

Die Beobachtungen erfolgen von zwei oder mehr Teleskopen im S-Band (2.3 GHz) und im X-Band (8.4 GHz). Das entspricht einer Wellenlänge von 13 bzw. 3.5 cm. Die Schüsseln der VLBI Antennen benötigen eine große Fläche, eine hohe Abtast- und Aufnahmezeit. Außerdem werden sehr sensitive und stabile Detektoren und Frequenzstandards gebraucht. Dies ist notwendig, da die Flussdichten des Signals von den Radioquellen sehr klein, im Bereich von 1 Jansky², sind. Eine weitere Anforderung an die Antennen ist eine hohe Drehrate, um Quellen, die weit voneinander am Himmel verteilt sind, schnell zu erreichen (Abschnitt 3.3) (Sovers et al., 1998). Um auf den Zeitunterschied τ zu kommen, müssen die aufgenommenen Daten noch miteinander korreliert werden. Die Beobachtungen werden an den Stationen noch mittels hochgenauer Atomuhren (Wasserstoff-Maser-Uhr) mit einem Zeitstempel versehen. Die Daten werden dann zu einem Korrelator geschickt, wo die sogenannte Kreuzkorrelation stattfindet (Böhm, J. und Schuh, 2013).

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T dt V_1(t) V_2^*(t - \tau) \quad (2.2)$$

Für die Kreuzkorrelation (Gleichung (2.2)) werden nach Sovers et al. (1998) die Spannungen der beiden Antennen $V_1(t)$ und $V_2(t)$ auf der Zeitachse t gegeneinander verschoben, bis die Funktion $R(\tau)$ ein Maximum erreicht hat. Wenn dieses erreicht ist, hat man den Zeitunterschied τ gefunden.

Der Zeitunterschied τ wird auch oft Gruppenlaufzeit τ_{gd} (engl. *group delay*) genannt und ist die eigentliche Beobachtung, die im Post-Korrelations-Prozess bestimmt wird (Schuh und Behrend, 2011). Während der Korrelation werden alle 1-2 Sekunden Amplituden und Phasen beobachtet. Dies geschieht normalerweise in

²1 Jy = $10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$

14 Frequenzkanälen ω_i gleichzeitig. In der Post-Korrelation werden Referenzwerte für die Zeit t_o und Frequenz ω_0 bestimmt. Das eigentliche Ziel in der Korrelation ist es, die Phase ϕ_0 , die Gruppenlaufzeit τ_{gd} und die Phasenrate $\dot{\tau}_{pd}$ an eine Auswahl an Phasen $\phi(\omega_i, t_j)$ aus den verschiedenen Frequenzkanälen ω_i und Zeiten t_j bestmöglich anzupassen. In einer bilinearen kleinste Quadrate Ausgleichung werden die drei aus der Phase ableitbaren Parameter $(\phi_0, \tau_{gd}, \dot{\tau}_{pd})$ zu der gemessenen Phase $\phi(\omega, t)$ bestimmt (Gleichung (2.3)) (Sovers et al., 1998).

$$\phi(\omega, t) = \phi_0(\omega_0, t_0) + \frac{\partial\phi}{\partial\omega}(\omega - \omega_0) + \frac{\partial\phi}{\partial t}(t - t_0) \quad (2.3)$$

Mit der Phasenlaufzeit τ_{pd} , Gruppenlaufzeit τ_{gd} und Phasenlaufzeitrate $\dot{\tau}_{pd}$.

$$\tau_{pd} = \frac{\phi_0}{\omega_0}, \tau_{gd} = \frac{\partial\phi}{\partial\omega}, \dot{\tau}_{pd} = \frac{1}{\omega_0} \frac{\partial\phi}{\partial t} \quad (2.4)$$

Die beobachteten Amplituden werden in der VLBI normalerweise nicht verwendet. Die Phasenlaufzeit τ_{pd} wird für die Lösung von Mehrdeutigkeiten in der Phase, des über eine große Distanz laufenden Signals, verwendet (Sovers et al., 1998). Die Gruppenlaufzeit ist in der VLBI der Parameter, der für geodätische und astronomische Anwendungen weiterverwendet wird (Schuh und Behrend, 2011).

Die Genauigkeit σ_τ des Zeitunterschiedes τ bzw. Gruppenlaufzeit kann aus dem Kehrwert des Signal-zu-Rausch Verhältnisses SNR und der Bandbreite B berechnet werden (Gleichung (2.5)) (Campbell, 2000; Schuh und Behrend, 2011). Je höher die Bandbreite und das SNR sind, desto genauer sind die Messungen, wie in Gleichung (2.5) erkennbar ist.

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{SNR \cdot B} \quad (2.5)$$

Das Signal-zu-Rausch Verhältnis wird folgendermaßen beschrieben:

$$SNR = \eta \cdot \rho_0 \cdot \sqrt{2 \cdot B \cdot T} \quad (2.6)$$

Die Variable η beschreibt hier den *digital loss factor*, ρ_0 die *correlation amplitude*, B die Bandbreite und T die *coherent integration time*. Von der *noise temperature* der Antenne und dem Signal, hängt die *correlation amplitude* ab (Böhm, J. und Schuh, 2013).

2.1.2 Beobachtungsgleichung

Zusätzlich zum geometrischen Zeitunterschied (engl. *delay*) τ_g , bisher als τ (Gleichung (2.1)) bezeichnet, wird nach Cannon (1999) noch um einige andere Terme (siehe Gleichung (2.7)) ergänzt, um auf die eigentliche Beobachtungsgleichung τ_{obs} der VLBI zu kommen.

$$\tau_{obs} = \tau_g + \tau_{clock} + \tau_{inst} + \tau_{tropo} + \tau_{iono} + \tau_{rel} \quad (2.7)$$

Mit den verschiedenen Einflüssen auf die Signalübertragung:

- τ_{clock} kommt aufgrund der nicht synchronisierten Referenzuhren an den jeweiligen Stationen zustande
- τ_{inst} ist eine Verzögerung aufgrund der Instrumente
- τ_{tropo} ist eine Laufzeitverzögerung aufgrund der Troposphäre
- τ_{iono} ist eine Laufzeitverzögerung aufgrund der Ionosphäre
- τ_{rel} kommt aufgrund von relativistischen Effekten zustande

All diese Effekte müssen im *post-processing* eliminiert werden, um eine genauere Lösung zu bekommen. Dies geschieht durch unterschiedliche Methoden:

- durch Methoden der bekannten Physik (τ_{rel})
- durch Kalibrierung der Instrumente (τ_{inst})
- im Zuge der Ausgleichsrechnung werden sowohl τ_{tropo} , als auch τ_{clock} geschätzt
- mittels der Messung in zwei Frequenzen (X- und S-Band) kann die τ_{iono} eliminiert werden (Cannon, 1999)

Die Gleichung (2.1) ist nur eine vereinfachte Form. Bevor diese Gleichung weiter behandelt werden kann, muss noch eine Transformation erfolgen. Der Basislinienvektor \vec{b} zwischen den Teleskopen wird in einem anderen Koordinatenrahmen als der Richtungsvektor \vec{k}_0 zur Quelle dargestellt. Ersterer wird in einem terrestrischen Koordinatenrahmen (z.B. ITRF2014 (Altamimi et al., 2016)) und letzterer in einem quasi-inertialen himmelfesten Referenzrahmen ausgedrückt (Schuh, 2000). Zur Gleichung (2.1) kommen daher noch eine Transformationsmatrix W der Polbewegung im terrestrischen System mit den Polkoordinaten (x_P, y_P) , eine Rotationsmatrix R für die Erdrotation mit dem Erdrotationswinkel (ERA) θ und eine Transformationsmatrix Q zur Berücksichtigung von Präzession und Nutation dazu (Petit und Luzum, 2010) (für eine genauere Beschreibung der drei Matrizen siehe Abschnitt 2.1.3.2).

$$\tau = \frac{\vec{b} \cdot WRQ \cdot \vec{k}_0}{c} \quad (2.8)$$

2.1.3 Theoretisches Delay Modell

Für die Berechnung des gekürzten Beobachtungsvektors (*observed - computed*) von τ werden sowohl beobachtete als auch berechnete Werte benötigt. Die Beobachtungen werden teilweise noch um die in Gleichung (2.7) genannten Effekte reduziert. Um das theoretische Modell zu berechnen, werden unter anderem *a priori* Werte

der Stations- und Quellenkoordinaten und Erdorientierungsparameter gebraucht. In Abb. 2.2 ist ein Flowchart Diagramm einer VLBI Analyse dargestellt. Auf der linken Seite ist die eigentliche Beobachtung und rechts das theoretische Modell dargestellt (Schuh, 2000; Böhm, J. und Schuh, 2013).

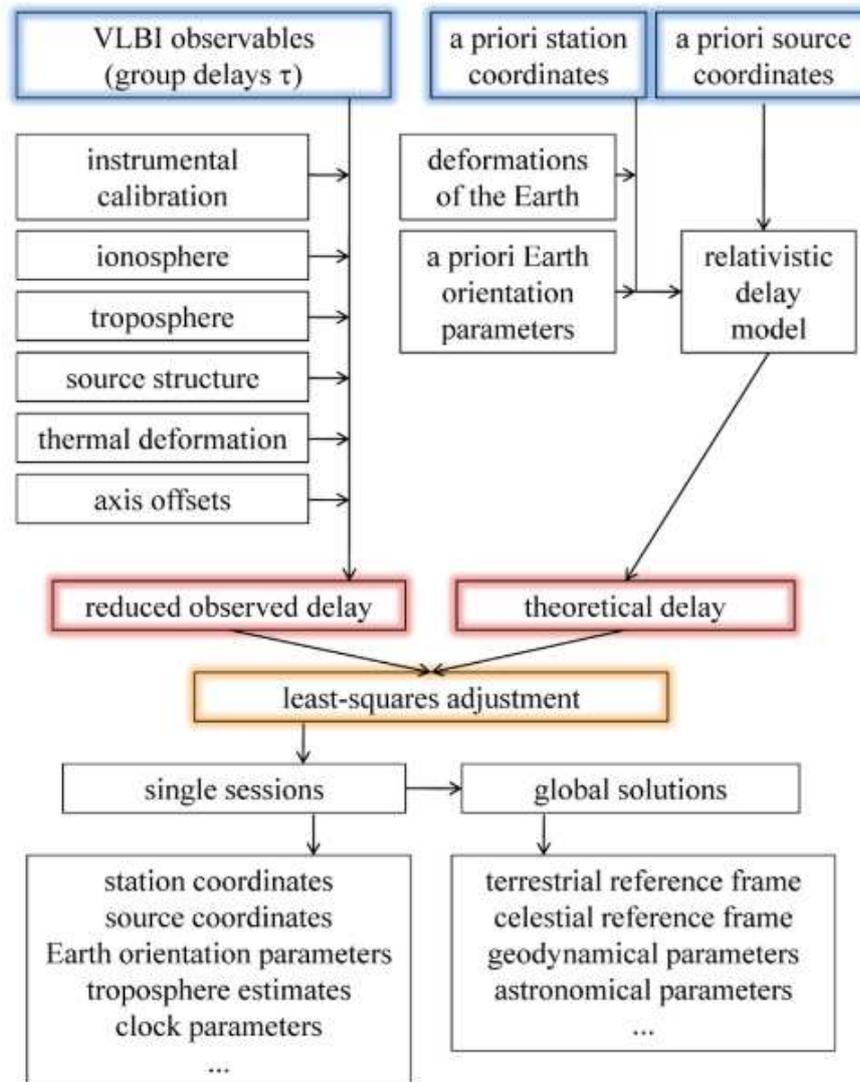


Abbildung 2.2: Flowchart einer VLBI Analyse (Böhm, J. und Schuh, 2013)

2.1.3.1 Stationskoordinaten

Zuallererst bedarf es für die Berechnung der mittleren Antennenkoordinaten zum Beobachtungszeitpunkt grober Stationskoordinaten und Geschwindigkeiten (Böhm, J. und Schuh, 2013). Diese sind z.B. die des *International Terrestrial Reference Frame 2014* (ITRF2014; Altamimi et al. (2016)). Um die Genauigkeit dieser groben Koordinaten zu erhöhen, müssen noch einige Verbesserungen angebracht werden, wie z.B. die periodischen und aperiodischen Deformationen der Erdkruste. *Solid earth tides*, *ocean tide loading* und *pole tide loading* gehören zu den größten periodischen Korrekturen (Böhm, J. und Schuh, 2013). Durch tägliche und halbtägliche *solid earth tides* kann es zu hohen Deformationen, sowohl in der Vertikalen als auch in der

Horizontalen, kommen. Erstere befinden sich im Bereich von ± 20 cm. In der Horizontalen befinden sich diese im Bereich von 30% des vertikalen Effektes (Böhm, J. und Schuh, 2013). Die Genauigkeit kann beim *ocean tide loading* in extremen Fällen nicht gewährleistet werden und ist daher ein limitierender Aspekt (Scherneck, 1991).

Laut Böhm, J. und Schuh (2013) gehen die Meinungen der Experten, ob man aperiodische Deformationen auf Beobachtungslevel korrigieren soll, auseinander. Petrov und Boy (2004) beschreiben die Deformationen in der vertikalen Komponente mit 20 mm und in der horizontalen mit 3 mm. Dennoch sind die Modelle, die benötigt werden, um diese Verschiebungen zu modellieren, nicht genau genug, um die Deformationen auf Beobachtungslevel zu korrigieren (Böhm, J. und Schuh, 2013).

Die Festlegung der Position, der Orientierung und des Maßstabes eines Koordinatensystems wird geodätisches Datum genannt. In der VLBI kann ein Datum für ein Netzwerk in Form von zwei unterschiedlichen Methoden festgelegt werden. Entweder es werden ein paar Stationskoordinaten auf ihre *a priori* Werte festgesetzt, oder es werden sogenannte *no-net-translation* (NNT), *no-net-rotation* (NNR) und *no-net-scale* (NNS) Bedingungen eingeführt. Das Datum wird mittels der zweiten Methode durch Setzen der drei Translationen auf Null, der drei Rotationen auf Null und des Maßstabsfaktors auf Eins relativ zu einem Satz von *a priori* Koordinaten festgelegt (Teke, 2011).

2.1.3.2 Erdorientierung

Wie weiter oben schon beschrieben, müssen die im ITRS (*International Terrestrial Reference System*) gegebenen Stationskoordinaten noch in das GCRS (*Geocentric Celestial Reference System*)³ transformiert werden (Petit und Luzum, 2010; Böhm, J. und Schuh, 2013). Die Transformation erfolgt zum Zeitpunkt t der Beobachtung.

$$GCRS = Q(t) \cdot R(t) \cdot W(t) \cdot ITRS \quad (2.9)$$

Die Matrizen Q , R und W sind die gleichen, wie bereits oben und nach Petit und Luzum (2010) beschrieben. Diese beschreiben die Bewegung des Himmelspols (*Celestial Intermediate Pole*; CIP) in dem himmelfesten Referenzsystem (Q), die Rotation der Erde um die Achse des Pols (R), und die Polbewegung (des CIP) im erdfesten Referenzsystem (W). Die jeweiligen Transformationsmatrizen setzen sich aus verschiedenen Rotationsmatrizen R_1 , R_2 und R_3 zusammen, welche die Rotationen um eine der drei Achsen (1, 2 oder 3) beschreiben.

Für die Bestimmung des CIP im erdfesten System sind die beiden Polkoordinaten (x_P, y_P) und der Parameter s' in der Matrix W gegeben (Gleichung (2.10)). Für die Transformation zwischen dem GCRS und ITRS wird ein zwischenzeitlicher Pol gebraucht. Bei diesem handelt es sich um den CIP, mit dem außerdem die Nutation von der Polbewegung separiert werden kann. Der Parameter s' beschreibt die Position des *Terrestrial Intermediate Origin* (TIO) auf dem Äquator des CIP (Petit und

³die hier beschriebenen Transformationen gelten auch für die jeweiligen Realisierungen des Referenzsystems (ITRF und ICRF) (Petit und Luzum, 2010)

Luzum, 2010).

$$W(t) = R_3(-s') \cdot R_2(x_P) \cdot R_1(y_P) \quad (2.10)$$

In einem himmelfesten Referenzsystem wird die Bewegung des CIP mit Frequenzen zwischen -0.5 cpsd^4 und $+0.5 \text{ cpsd}$ (-48 h bis $+48 \text{ h}$ Periode) als Nutation definiert (Abb. 2.3 obere Hälfte). Jede Bewegung des CIP außerhalb dieses Frequenzbandes wird als Polbewegung definiert. Für die Bewegung des CIP im terrestrischen Referenzsystem verschiebt sich das Frequenzband. Hier wird die Nutation mit Frequenzen zwischen -1.5 cpsd bis -0.5 cpsd (-16 h bis -48 h Periode) definiert. Als Polbewegung sind dann alle Frequenzen außerhalb definiert (Abb. 2.3 untere Hälfte) (Gross, 2007).

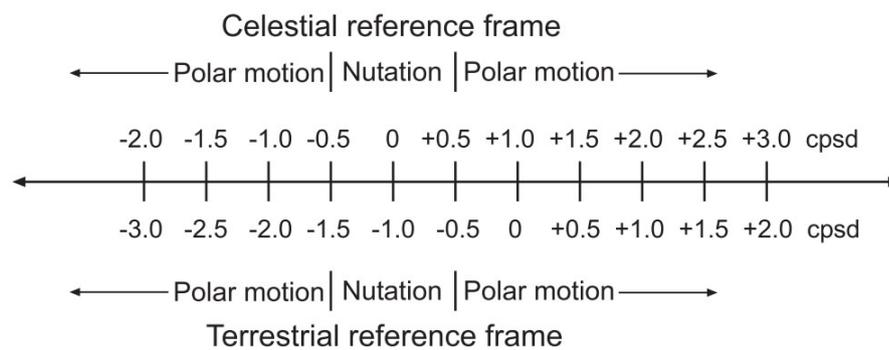


Abbildung 2.3: Beziehung der Frequenzbänder der Bewegung des CIP im himmelfesten (obere Hälfte) und im erdfesten (untere Hälfte) Referenzrahmen (Gross, 2007)

Für die Rotation zwischen dem erdfesten und dem himmelfesten Referenzsystem wird der sogenannte *Earth Rotation Angle* (ERA) θ für die Matrix R verwendet (Gleichung (2.11)). Der Winkel verbindet den TIO mit dem CIO (Petit und Luzum, 2010). Für diesen wird in beiden Systemen ein Ursprung (Nullpunkt) benötigt. Dieser Ursprung ist im himmelfesten System der *Celestial Intermediate Origin* (CIO) und im erdfesten der *Terrestrial Intermediate Origin* (TIO) (Capitaine und Wallace, 2008). Die Parameter CIO und TIO entsprechen der Definition eines *Non-Rotating Origin* (NRO). Der TIO befindet sich in der geographischen Länge mit einer Genauigkeit von 0.1 mas vom Jahre 1900 bis 2100 innerhalb des Nullmeridians des ITRF. Mit einer Genauigkeit von 0.1 as bleibt der CIO von 1900 bis 2100 innerhalb des GCRS Meridians (Petit und Luzum, 2010).

$$R(t) = R_3(-ERA) \quad (2.11)$$

Für die letzte Matrix der Gleichung (2.9) Q wird die Bewegung des CIP im GCRS und der Parameter s gebraucht (Gleichung (2.12)). Mittels des Parameters s , der von den Koordinaten X und Y abhängt, wird die Position des CIO am Äquator des CIP dargestellt. Durch die Präzession und Nutation kommt es zur Bewegung des

⁴ *cycles per sidereal day* = Frequenz, Periode = $\frac{1}{\text{Frequenz}}$

CIP im GCRS zwischen der Referenzepoche und dem Datum t (Petit und Luzum, 2010).

$$Q(t) = R_3(E) \cdot R_2(-d) \cdot R_3(E) \cdot R_3(s) \quad (2.12)$$

Die Parameter E und d beschreiben die Koordinaten X , Y und Z (Gleichung (2.13)) des CIP im GCRS (Petit und Luzum, 2010).

$$X = \sin d \cos E \quad Y = \sin d \sin E \quad Z = \cos d \quad (2.13)$$

Die Beziehung zwischen dem Erdrotationswinkel θ und UT1 ist nach Capitaine et al. (2000) folgendermaßen:

$$\theta(T_u) = 2\pi(0.7790572732640 + 1.00273781191135448T_u \cdot 36525) \quad (2.14)$$

wobei

$$T_u = (\text{JulianUT1date} - 2451545.0)/36525 \quad (2.15)$$

und

$$UT1 = UTC + (UT1 - UTC) \quad (2.16)$$

Als *Universal Time 1* (UT1) wird die mit der Erdrotation verbundene Zeit bezeichnet, *Coordinated Universal Time* (UTC) wird die koordinierte Weltzeit genannt. Mittels der VLBI kann durch die tägliche Beobachtung der Bewegung von Quasaren der Parameter UT1 bestimmt werden (Petit und Luzum, 2010). Die Differenz von UT1-UTC wird auch dUT1 genannt und ist eines der Produkte, die nur durch die VLBI bestimmt werden können. Die anderen geodätischen Weltraumverfahren wie *Global Navigation Satellite System* (GNSS), oder *Satellite Laser Ranging* (SLR) können nur die zeitliche negative Ableitung von dUT1 beobachten. Dieser Wert wird auch *Length of Day* (LoD) genannt (Böhm, J. und Schuh, 2013). Der Grund dafür ist, dass UT1 mit den Satellitenbahnelementen von GNSS und SLR zusammenhängt und nicht von diesen separiert werden kann. Der Parameter LoD kann aufgrund von Fehlern in der Satellitenbahn nur mit bedingter Genauigkeit bestimmt werden und braucht daher Werte von VLBI Messungen, um die von GNSS beobachteten Werte anzupassen (Gross, 2007). Für die Nutationsparameter können mit den geodätischen Weltraumverfahren, bis auf die VLBI, keine Absolutwerte, sondern nur zeitliche Änderungen bestimmt werden. Dies ist durch Korrelation mit den Satellitenbahnelementen bedingt (Schmidt et al., 2010).

Der Parameter UTC unterscheidet sich um eine gewisse Anzahl n an Integer SI-Sekunden von der *International Atomic Time* (TAI) $UTC = TAI + n$ (Böhm, J. und Schuh, 2013). Der Parameter n wird so gewählt, dass immer gilt $|UT1 - UTC| < 0.9$ Sekunden (Petit und Luzum, 2010).

Als Zuschläge zum IAU 2006/2000A Präzession-Nutations Modell ($X_{IAU2006/2000}$, $Y_{IAU2006/2000}$) werden mittels VLBI Beobachtungen sogenannte

celestial pole offsets ($\delta X, \delta Y$) beobachtet⁵ (Gleichung (2.17)). Diese Zuschläge werden vom *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS)⁶ in Form von Differenzen der Koordinaten des CIP im GCRS zum IAU 2006/2000A Präzession-Nutations Modell zur Verfügung gestellt. Der Hauptgrund für die Differenzen ist die fehlende Berücksichtigung der *Free Core Nutation* (FCN) im Präzession-Nutations Modell. Durch die Abweichung der Rotationsachse des Kerns vom Mantel der Erde kommt es zu dem Effekt der FCN (Petit und Luzum, 2010).

$$X = X_{IAU2006/2000} + \delta X \quad (2.17)$$

$$Y = Y_{IAU2006/2000} + \delta Y \quad (2.18)$$

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass um eine Verbindung des ICRF zum ITRF zu schaffen, die vom IERS bereitgestellten Erdorientierungsparameter verwendet werden. Die Polkoordinaten und die *celestial pole offsets* als Zuschläge zum Präzession-Nutations Modell werden im erdfesten und im himmelfesten System für die Orientierung des CIP gebraucht und die Differenz $UT1 - UTC$ für die Orientierung der Erde um die Achse des CIP (Petit und Luzum, 2010).

2.1.3.3 Verzögerung in der Atmosphäre

Die Ionosphäre ist für elektromagnetische Wellen (z.B. im X- und S-Band der VLBI Beobachtung) ein dispersives Medium, d.h. die Geschwindigkeit der Welle hängt von der Frequenz ab. Da VLBI Messungen in zwei Frequenzbändern durchgeführt werden, kann die Verzögerung der Laufzeit durch die Ionosphäre mittels Linearkombinationen eliminiert werden (Hobiger, 2006).

Die Troposphäre ist im Gegensatz zur Ionosphäre ein nicht dispersives Medium (Petit und Luzum, 2010), muss daher modelliert werden und ist für Mikrowellen eine große Fehlerquelle, die berücksichtigt werden muss (Böhm, J. et al., 2006). Der Term Neutrale Atmosphäre wird oft für die Troposphäre verwendet. Um die Verzögerung eines Signals durch die Troposphäre zu beschreiben, muss zwischen zwei verschiedenen Laufwegen unterschieden werden. Im Vakuum würde ein Signal den Weg einer Geraden G nehmen, in der Troposphäre hingegen nimmt das Signal den Weg einer gekrümmten Raumkurve S (Abb. 2.4) (Böhm, J., 2004).

Die Verzögerung in der neutralen Atmosphäre (Gleichung (2.20)) setzt sich aus dem Unterschied zwischen $S - G$ (dem sogenannten Beugungseffekt) und dem Refraktionsindex n zusammen. Der Parameter n wird für die Bestimmung der Weglänge L entlang der gekrümmten Raumkurve S gebraucht (Gleichung (2.19)) (Böhm, J., 2004).

$$L = \int_S n(s) ds \quad (2.19)$$

$$\delta L = \left[\int_S (n(s) - 1) ds \right] + [S - G] \quad (2.20)$$

⁵im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit nutdX, nutdY, oder Nutationsparameter (in x- und y-Richtung) genannt

⁶<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

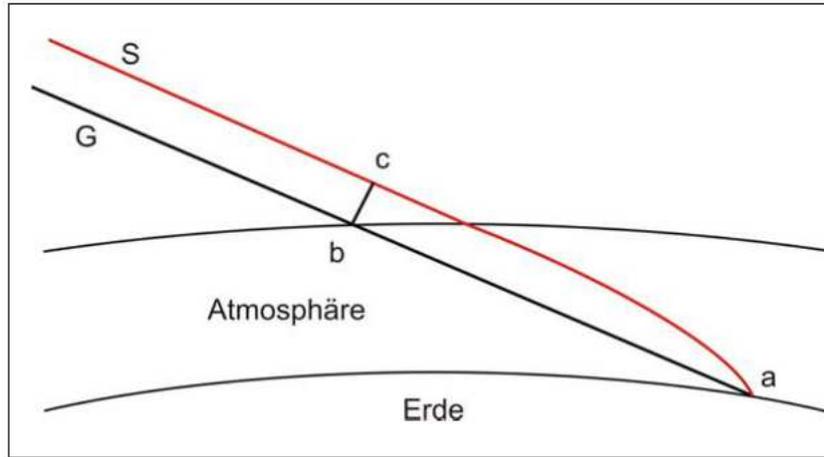


Abbildung 2.4: Geometrischer Signalweg G und gekrümmter Weg S aufgrund der Atmosphäre (Böhm, J., 2004)

Wenn man die Troposphäre in einen trockenen N_d ⁷ und feuchten Anteil N_w aufteilt, den Beugungseffekt aufgrund der Berücksichtigung mit der *Mapping Function* (Gleichung (2.23)) nicht anschreiben muss und mit Hilfe der Refraktivität N (Einheit ppm), anstatt von n mit $N = (n - 1) \cdot 10^{-6}$ ersetzt, kann man folgende Formel schreiben (Gleichung (2.20))(Böhm, J., 2004).

$$\Delta L = \int_S (n(s) - 1) ds = 10^{-6} \int_S N(s) ds = 10^{-6} \left[\int_S N_d ds + \int_S N_w ds \right] \quad (2.21)$$

Die atmosphärische Laufzeitverzögerung der Troposphäre kann in einen hydrostatischen und feuchten Anteil aufgeteilt werden. Die hydrostatische Verzögerung kann als *a priori* Wert sehr genau berechnet werden und ist für ca. 90% der gesamten Verzögerung in der Atmosphäre verantwortlich. Für den feuchten Anteil gibt es noch keine perfekte Methode, um einen *a priori* Wert mit sub-Dezimeter Genauigkeit zu berechnen. Für Anwendungen mit dieser Genauigkeitsanforderung wird der feuchte Anteil im Zuge der Ausgleichsrechnung mitgeschätzt (Petit und Luzum, 2010). Der hydrostatische Anteil kann mit dem Druck p in hPa und den zugehörigen Stationskoordinaten (Breite ϕ und Höhe h in m) nach der Gleichung (2.22) von Saastamoinen (1972), gegeben von Davis et al. (1985), berechnet werden (Böhm, J. et al., 2006).

$$\Delta L_h^z = 0.0022768 \cdot \frac{p}{(1 - 0.00266 \cdot \cos(2\phi) - 0.28 \cdot 10^{-6} \cdot h)} \quad (2.22)$$

Die gesamte Verzögerung in der Troposphäre $\Delta L(e)$ mit dem Höhenwinkel e setzt sich dann aus dem hydrostatischen Anteil ΔL_h^z und dem feuchten Anteil ΔL_w^z multipliziert mit der jeweiligen *Mapping Function* zusammen (z.B. Ansatz nach Davis et al. (1985), Gleichung (2.23)) (Böhm, J., 2004).

⁷im weiteren Verlauf trocken=hydrostatisch

Die beiden unterschiedlichen Wege S und G des Signals (Abb. 2.4) sind, wenn man von einer Atmosphäre mit nur horizontalen Schichten ausgeht, im Zenit ohne Unterschied. In Elevationen von 5° macht sich der Beugungseffekt bemerkbar, die Differenz von $S - G$ beträgt hier schon ca. 10 cm. Der Sinn der *Mapping Function* besteht darin, die Verzögerungen der Laufzeit im Zenit in den Elevationswinkel der Beobachtung umzuwandeln (Böhm, J., 2004).

Für die Gleichung (2.23) wird vorausgesetzt, dass sich die Laufzeitverzögerung bei gleichbleibender Elevation nicht durch die Variation des Azimuts der Radioquelle ändert (Böhm, J., 2004).

$$\Delta L(e) = \Delta L_h^z \cdot mf_h(e) + \Delta L_w^z \cdot mf_w(e) \quad (2.23)$$

Diese *Mapping Functions* werden für den hydrostatischen und feuchten Anteil separat berechnet, indem die Koeffizienten a, b und c verwendet werden, um die Verzögerung im Zenit für eine Elevation (Höhenwinkel) von 3° zu berechnen (Böhm, J. und Schuh, 2004). Die ursprüngliche *Mapping Function* auf der alle darauffolgenden aufbauen, wurde von Herring (1992) vorgeschlagen Gleichung (2.24)).

$$mf(e) = \frac{1 + \frac{a}{1 + \frac{b}{1+c}}}{\sin e + \frac{a}{\sin e + \frac{b}{\sin e + c}}} \quad (2.24)$$

Die Gleichung (2.24) gilt als Grundlage für z.B. *Niell Mapping Functions* (NMF) (Niell, A. E., 1996), *Isobaric Mapping Functions* (IMF) (Niell, A. et al., 2001), *Vienna Mapping Functions* (VMF) (Böhm, J. und Schuh, 2004), *Vienna Mapping Functions 1* (VMF1) (Böhm, J. et al., 2006) und die VMF3 (Landskron und Böhm, J., 2018b). Für die VMF1 hängen die Funktionen, aus denen die Koeffizienten b und c der Gleichung (2.24) hervorgehen, von dem Tag der Beobachtung und dem Breitengrad der Station ab. In einer Zeitserie mit 6 Stunden Auflösung wird der Koeffizient a , welcher den hydrostatischen und feuchten Anteil beinhaltet, beschrieben. Das *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) stellt diese drei Koeffizienten als Prognose Daten zur Verfügung (Böhm, J. und Schuh, 2013). Um eine noch bessere Genauigkeit und Präzision zu erreichen, wurden die *Vienna Mapping Functions 3* nach Landskron und Böhm, J. (2018b) entworfen. Im Vergleich zur VMF1 werden die Koeffizienten a, b und c der VMF3 auf eine andere Art und Weise bestimmt, sodass in kleinen Elevationswinkeln die Laufzeitverzögerung besser durch die *Mapping Functions* angenähert wird.

Für die Gleichung (2.23) mit der *Mapping Function* (Gleichung (2.24)) wird davon ausgegangen, dass die Laufzeitverzögerung durch die Atmosphäre unabhängig vom Azimut ϕ ist. Es handelt sich daher um eine azimutale Symmetrie (Böhm, J., 2004). MacMillan (1995) schreibt, dass es bei Vernachlässigung des Azimuts zu Fehlern der Schätzung der Stationskoordinaten kommen kann. Chen und Herring (1997) schlagen für die Berechnung der Gradienten die Gleichung (2.25) vor (Landskron und Böhm, J., 2018a). Landskron und Böhm, J. (2018a) erweitern diese Gleichung um Terme höherer Ordnung. Außerdem werden die beiden Gradienten in einen feuchten und hydrostatischen Teil aufgespalten. Gradienten werden normalerweise im Zuge der Ausgleichsrechnung mitgeschätzt, es ist aber auch möglich, diese

schon im Modell einzuführen (Landskron und Böhm, J., 2018a).

$$\Delta L(\phi, e) = mf_{az}(e) \cdot [G_N \cos \phi + G_E \sin \phi] \quad (2.25)$$

Die $mf_{az}(e)$ ist die von der Elevation abhängige Gradienten *Mapping Function*, die Komponenten G_N und G_E sind die Gradienten in Nord- und Ost-Richtung.

2.1.4 Parameterschätzung

Im Zuge der Ausgleichung der Beobachtungen werden nun die in Abschnitt 2.1.3 berechneten theoretischen Werte des Zeitunterschiedes τ mit den beobachteten und von allen Fehlern korrigierten Werten aus Abschnitt 2.1.2 als *observed minus computed* ausgeglichen. Für die Ausgleichungsaufgabe kann sowohl das klassische Gauß-Markov Modell als auch der Kalman-Filter (Herring et al., 1990) und die Kollokation (Titov und Schuh, 2000) verwendet werden (Böhm, J. und Schuh, 2013)

Da normalerweise mehr Beobachtungsgleichungen, als Unbekannte vorhanden sind, können mittels der Methode der kleinsten Quadrate die unbekannt Parameter in einem überbestimmten Gleichungssystem geschätzt werden. Durch ein überbestimmtes Gleichungssystem gibt es keine eindeutige Lösung. Die Methode der kleinsten Quadrate kann daher angewendet werden, um die gewichtete Quadratsumme der Verbesserungen v zu minimieren. Das funktionale und stochastische Modell der Ausgleichsrechnung wird nach Gleichung (2.26) angeschrieben (Böhm, J. und Schuh, 2013). Die Matrix A beschreibt die Beobachtungsgleichungen, abgeleitet nach den Unbekannten, x den Parametervektor der Unbekannten, l den reduzierten Beobachtungsvektor (*observed minus computed*) und v die Residuen zu den Beobachtungen.

$$A \cdot x = l + v \quad \text{oder in Vektorschreibweise} \quad \begin{bmatrix} A_{ro} \\ A_{po} \end{bmatrix} \cdot x = \begin{bmatrix} l_{ro} \\ l_{po} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ro} \\ v_{po} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Der Parametervektor der Unbekannten wird dann angeschrieben als:

$$x = N^{-1} A^T P l \quad (2.27)$$

mit der Normalgleichungsmatrix $N = A^T P A$ und der Gewichtsmatrix P (Böhm, J. et al., 2018).

$$P = \begin{bmatrix} P_{ro} & 0 \\ 0 & P_{po} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Die Matrix A beinhaltet zwei Terme, die Submatrizen A_{ro} und A_{po} . Erstere beinhaltet die realen Beobachtungsgleichungen nach den Unbekannten. Da normalerweise die Parameter nicht durchgehend, sondern in einem Intervall, um die Anzahl der zu schätzenden Parameter gering zu halten, geschätzt werden, kann es zu Problemen

kommen. Wenn z.B. der *zenith wet delay* alle 20 Minuten geschätzt wird, es aber keine Beobachtung in genau einem dieser Intervalle gibt, kann dies zu Singularitäten führen. Um dieses Problem zu vermeiden, werden Pseudobeobachtungen durch die Matrix A_{po} eingeführt, indem die Flexibilität der Parameter eingeschränkt wird. In dem Vektor l_{ro} stehen die *observed minus computed* Beobachtungen, der Vektor l_{po} ist jedoch mit Pseudobeobachtungen gefüllt, die normalerweise aus Nullwerten bestehen (Böhm, J. und Schuh, 2013).

Das Konzept, die Parameter in einem fixen Intervall mit Zwängen zu schätzen, wird auch *continuous piece-wise linear offset* (CPWLO) genannt (Gleichung (2.29)) (Teke et al., 2012). Da es nicht möglich ist, für jede Beobachtung alle Parameter zu jedem Zeitpunkt zu schätzen, wird durch das Konzept der CPWLO eine Form der Interpolation eingeführt (Mayer, 2019)

$$x_i = x_1 + \frac{t - t_1}{t_2 - t_1} \cdot (x_2 - x_1) \quad (2.29)$$

Die Gleichung (2.29) wird das funktionale Modell genannt, mit den CPWLO x_1 und x_2 . Diese beiden Parameter werden zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 in UTC Integerstunden geschätzt. Der Parameter t beschreibt den Zeitpunkt der Beobachtung des Wertes x_i . Das Schema der CPWLO wird in Abb. 2.5 gezeigt (Teke et al., 2012).

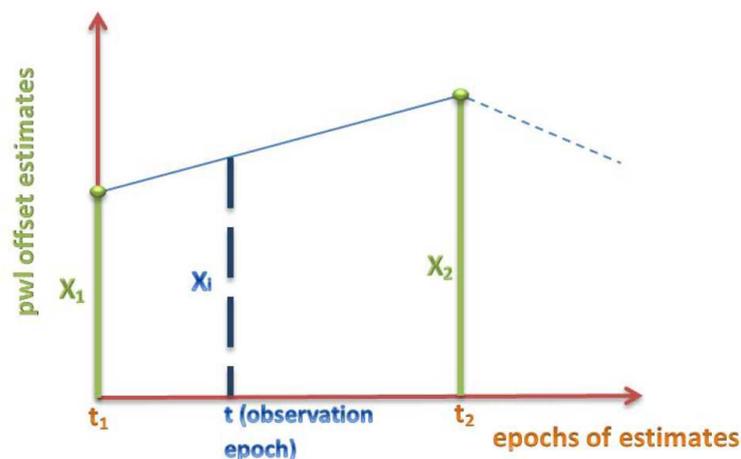


Abbildung 2.5: *continuous piece-wise linear offset* (CPWLO) (Teke, 2011)

Die Parameter, die als CPWLO geschätzt werden können, sind unter anderem die Uhrenfehler, feuchte Laufzeitverzögerungen der Troposphäre in Zenitrichtung, alle 5 Erdorientierungsparameter, TRF und CRF Koordinaten (Teke et al., 2012). Die CPWLO werden alle in Bezug auf eine Referenzuhr geschätzt, deswegen muss ein besonderes Augenmerk auf sogenannte *clock breaks* gelegt werden. Diese scheinen als große Sprünge in den Residuen auf und müssen entfernt werden (Böhm, J. und Schuh, 2013).

2.1.5 Globale Lösung

Mit einer größeren Anzahl an VLBI Sessions können in einer globalen Lösung (*global solution*) globale Parameter, wie z.B. durch Krásná (2013), beschrieben für die Bestimmung des TRF die Koordinaten und Geschwindigkeiten der Stationen und für den CRF die Koordinaten der Radioquellen, geschätzt werden. Der Kleinste-Quadrate Ausgleich wird in einer *single session* für jeden Tag einzeln gerechnet. In der globalen Lösung werden die Parameter von allen Sessions (Tagen) in einem gemeinsamen Ausgleich geschätzt. Um die Normalgleichungsmatrizen klein zu halten, wird ein Algorithmus verwendet, in dem N in einen Teil mit zu schätzenden Parametern (Parameter für die globale Lösung) und einen mit zu reduzierenden Parametern aufgeteilt wird. Dieses Verfahren wird auch Reduzierungsalgorithmus genannt (Böhm, J. und Schuh, 2013).

Die zu reduzierenden Parameter sind solche, die nicht für die globale Berechnung gebraucht werden und daher nur aus der *single session solution* berechnet werden. Diese sind z.B. Uhrenparameter, feuchte Laufzeitverzögerungen im Zenit, oder troposphärische Gradienten (Krásná, 2013). Das Normalgleichungssystem (Gleichung (2.30)) schaut nun wie folgt aus:

$$\begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dx_1 \\ dx_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Der Parameter dx_2 mit den Parametern aus der *single session solution*, die nicht für die globale Lösung gebraucht werden, kann durch Substitution entfernt werden (Gleichung (2.31)) (Krásná, 2013; Mayer, 2019).

$$(N_{11} - N_{12}N_{22}^{-1}N_{21}) \cdot dx_1 = b_1 - N_{12}N_{22}^{-1} \cdot b_2 \quad \text{bzw.} \quad N_R \cdot dx_1 = b_R \quad (2.31)$$

N beschreibt $A^T P A$ und b beschreibt $A^T P l$. Die globalen reduzierten Parameter N_G und b_G werden aus der Summe der reduzierten Parametern N_R und b_R , ohne den Parametern aus der *single session solution* gebildet (Gleichungen (2.32) und (2.33)).

$$N_G = N_{R1} + N_{R2} + N_{R3} + \dots, \quad (2.32)$$

$$b_G = b_{R1} + b_{R2} + b_{R3} + \dots \quad (2.33)$$

Durch eine Inversion des globalen Normalgleichungssystems können die finalen gewollten globalen Parameter $dx_G = dx_1$ berechnet werden (Krásná, 2013):

$$dx_G = N_G^{-1} \cdot b_G \quad (2.34)$$

Im letzten Schritt werden für die Matrizen noch Bedingungen und relative Zwänge (*constraints*) eingeführt, um das System nicht singulär werden zu lassen. In einem zu

berechnenden Intervall, wo keine Beobachtungen durchgeführt wurden, werden die relativen Zwänge eingeführt. Dadurch werden Pseudobeobachtungen hinzugefügt, die das System davor bewahren, singular zu werden (Böhm, J. und Schuh, 2013). Wenn Parameter auf ihre *a priori* Werte fixiert werden sollen, können absolute Zwänge eingeführt werden (VieVs Wiki, 2019). Es müssen mindestens 6 Bedingungen bzw. Zwänge (für ein 3D-VLBI Koordinatensystem) eingeführt werden, um das Rangdefizit zu eliminieren. In der VLBI wird kein *no-net-scale* (NNS) eingeführt, da der Maßstab direkt von der Lichtgeschwindigkeit abhängt (Böhm, J. und Schuh, 2013) (siehe auch Abschnitt 2.1.3.1). Die Bedingungen für die relativen Zwänge sind für die datumsdefinierenden Stationen im TRF eine *no-net-translation* (NNT) und eine *no-net-rotation* (NNR) (Krásná, 2013). Für das Datum des CRF wird nur eine NNR eingeführt. Für die Festlegung des Datums ist es von Vorteil, Stationen und Quellen ohne große Sprünge in den einzelnen Koordinaten auszuwählen, da die Qualität des Ergebnisses sonst darunter leidet (Böhm, J. und Schuh, 2013).

2.2 Vienna VLBI Software - VieVS

Die Vienna VLBI Software (VieVS) ist eine Analysesoftware für VLBI bezogene Anwendungen. Sie wurde am Department für Geodäsie und Geoinformation an der Technischen Universität Wien (TU Wien) entwickelt (Böhm, J. et al., 2012). Die Entwicklung begann im Jahr 2008 und wird stetig weitergeführt. Die Programmierung der Software erfolgte mit der kommerziellen Software MATLAB⁸ (Madzak et al., 2014; Böhm, J. et al., 2018). Obwohl MATLAB nicht kostenlos ist, bietet es trotzdem eine Menge Vorteile, da die Handhabung und Programmierung einfach zu erlernen und zu verwenden sind. Auch wenn andere Programmiersprachen, wie z.B. C++ oder FORTRAN schneller als MATLAB sind, hat dies keine großen Auswirkungen auf den normalen Gebrauch der Software (VieVs Wiki, 2019). Über ein *graphical user interface* (GUI) in MATLAB können mehrere Module gesteuert werden: die Basismodule `Vie_INIT`, `Vie_MOD`, `Vie_LSM`, sowie die Erweiterungen `Vie_SCHED`, `Vie_SIM` und `Vie_GLOB` (Abb. 2.6).

2.2.1 Vie_INIT

In diesem Modul werden die Eingangsdaten initialisiert. Die zugelassenen Formate sind das NGS Format und die VGOSDB Datenbank, in dem sich die beobachteten Zeitverzögerungen (Gruppenlaufzeiten) τ befinden (VieVs Wiki, 2019). Die Zeitverzögerung aufgrund der Ionosphäre sowie die Mehrdeutigkeiten der Gruppenlaufzeit wurde in diesen Dateien schon im Voraus behandelt und entfernt (Böhm, J. et al., 2018). Es müssen noch von einem TRF und CRF Katalog die jeweiligen Stations- und Quellenkoordinaten, sowie die Geschwindigkeiten der Stationen eingelesen werden (Krásná, 2013). Außerdem ist es in diesem Schritt möglich, in einem OPT File *clock breaks* zu setzen sowie Stationen, Quellen oder Basislinien von der Berechnung auszuschließen. In einem *outlier file* können Ausreißer von den Beobachtungen mit dem Modul `Vie_LSM` detektiert und mit `Vie_INIT` entfernt werden. Dafür muss das Programm einmal zum Detektieren und ein zweites Mal zum Entfernen ausgeführt werden (VieVs Wiki, 2019).

⁸<https://de.mathworks.com/products/matlab.html>

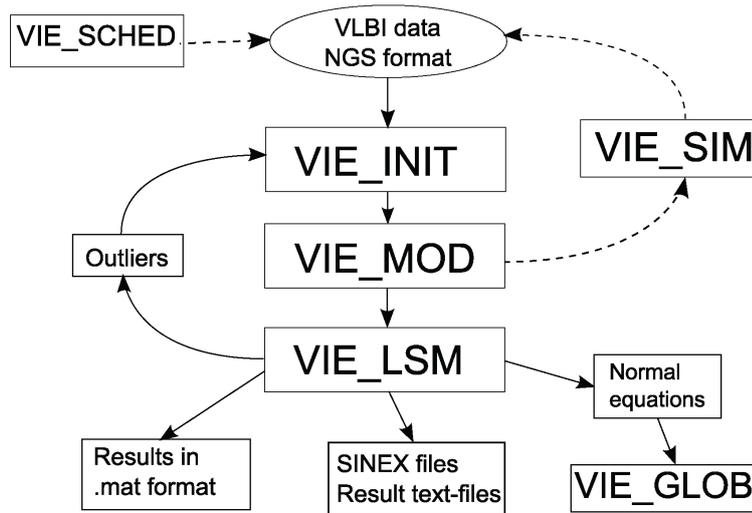


Abbildung 2.6: Struktur der VieVS Software mit allen Modulen (VieVs Wiki, 2019)

2.2.2 Vie_MOD

Mittels `Vie_MOD` können die theoretischen Laufzeitverzögerungen (Abschnitt 2.1.3) berechnet werden. Die Berechnung des theoretischen Modells erfolgt nach den IERS *Conventions* 2010 von Petit und Luzum (2010). Weiters werden hier die partiellen Ableitungen der Parameter, die später ausgeglichen werden, bestimmt (Krásná, 2013; VieVs Wiki, 2019). Die zur Auswahl stehenden Modelle für Stations- und Quellenkoordinaten in diesem Modul sind unter anderem der ITRF (z.B. ITRF2014 (Altamimi et al., 2016)) und der ICRF (z.B. ICRF3) (Abschnitt 2.1.3.1). Zur Realisierung des ICRF3 und ITRF2014 hat unter anderem eine Lösung, die mit VieVS ermittelt wurde, beigetragen (Böhm, J. et al., 2018). Weitere zur Auswahl stehenden Parameter sind unter anderem die *Mapping Functions* für die hydrostatische und feuchte Laufzeitverzögerungen in der Troposphäre (z.B. VMF1 (Böhm, J. et al., 2006), oder VMF3 (Landskron und Böhm, J., 2018b)) (Abschnitt 2.1.3.3). Ebenso können Korrekturen der Stationskoordinaten (Abschnitt 2.1.3.1) sowie verschiedene *a priori* Zeitserien der Erdorientierungsparameter, wie zum Beispiel die EOP 2014 C04 Zeitserie vom IERS, ausgewählt werden (VieVs Wiki, 2019).

2.2.3 Vie_LSM

In diesem Abschnitt werden die unbekannt Parameter nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt (Abschnitt 2.1.4). Die Parameter werden als CPW-LO in einem festen Intervall, normalerweise zu Integer Stunden, oder Teilen davon, geschätzt. Zwischen den Intervallen können strengere oder lockere Zwänge gewählt werden (Böhm, J. et al., 2018; VieVs Wiki, 2019). Strengere Zwänge werden für die EOP dann gewählt, wenn man konstante Werte für die komplette Beobachtung erhalten will. Für eine höhere zeitliche Auflösung der EOP (z.B. in einem tageweisen oder stündlichen Schätzintervall) müssen lockere Zwänge für die EOP ausgewählt

werden (Böhm, J. et al., 2018). Lockere Zwänge sind speziell für die globale Lösung erforderlich, vor allem, wenn die EOP im Zuge der globalen Lösung geschätzt und nicht reduziert werden sollen (siehe Abschnitt 2.1.5).

2.2.4 Vie__SCHED

Hier können Beobachtungspläne für VLBI Beobachtungen erstellt werden. Mit einer Modulerweiterung nach Plank et al. (2014) und Hellerschmied et al. (2015) können VLBI Beobachtungen zu Satelliten durchgeführt werden um z.B. sogenannte *inter-technique frame ties*⁹ zu beobachten.

Beobachtungspläne können außerdem noch mit dem neuen selbständigen VieVS Modul VieSched++ nach Schartner und Böhm, J. (2019) erstellt werden. Da dieses Planungsmodul in dieser Diplomarbeit nicht verwendet wird, wird nicht weiter darauf eingegangen.

2.2.5 Vie__SIM

In dem Modul Vie_SIM können entweder mittels Vie_SCHED erstellte oder reale Beobachtungspläne simuliert werden (VieVs Wiki, 2019). Auch dieses Modul wird in der Diplomarbeit nicht verwendet und wird daher nicht weiter behandelt.

2.2.6 Vie__GLOB

Im letzten Modul Vie_GLOB können globale Parameter von mehreren *single sessions* bestimmt werden. Für eine genauere Beschreibung der globalen Lösung siehe Abschnitt 2.1.5.

⁹Diskrepanzen bei der Verknüpfung der geodätischen Weltraumverfahren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Kapitel 3

Continuous VLBI Campaign 2017

In diesem Kapitel wird die Beobachtungskampagne CONT17 näher erläutert, mit deren Daten die Erdorientierungsparameter in dieser Diplomarbeit berechnet wurden.

3.1 Allgemeines

Die *Continuous VLBI Campaign 2017* (CONT17) war eine vom 28. November 2017 00:00 *Universal Time* (UT) bis zum 12. Dezember 2017 24:00 UT durchgeführte Beobachtungskampagne, organisiert vom *IVS Coordinating Center at NASA Goddard Space Flight Center* (GSFC). Diese CONT Kampagnen finden seit dem Jahr 1994 in der Regel alle 3 Jahre statt (Behrend et al., 2017; Nothnagel, 2019). CONT Kampagnen öfters als alle drei Jahre durchzuführen, ist laut einem Beschluss des *Observing Program Committee* (OPC) aus dem Jahr 2005 nicht sinnvoll, da die Belastung der durchführenden Stationen und Korrelatoren zu hoch wäre. Für die neuen VGOS Antennen ist jedoch angestrebt, durchgängige Beobachtungskampagnen 365 Tage im Jahr durchzuführen (Behrend et al., 2017). Ziel dieser Kampagnen ist es, innerhalb von einem gewissen Zeitraum den Gewinn von solchen langen durchgehenden Beobachtungen zu zeigen. In diesen Messungen wird die zu dem Zeitpunkt der Beobachtung erreichbare Genauigkeit der VLBI deutlich gemacht. Solch eine gute Genauigkeit wird durch die im Vorfeld getätigte intensive Vorbereitung erreicht. Die teilnehmenden Stationen werden genauestens auf Probleme untersucht und getestet. Damit kann sichergestellt werden, dass nur die am besten agierenden Stationen an der Beobachtung teilnehmen werden. Die Ergebnisse der Beobachtungen können für eine Menge an wissenschaftlichen Studien herangezogen werden. Als Beispiele sind z.B. die Schwankungen der Erdorientierungsparameter mit höchster Genauigkeit zu messen, oder auch die durch Bewegungen der Stationen bedingte Stabilität des Referenzrahmens (ITRF) zu bestimmen (MacMillan, 2017).

Im Gegensatz zu vorherigen CONT Kampagnen, die nur mit einzelnen Stationen stattgefunden haben, wurde CONT17 mit Hilfe von drei unabhängigen VLBI Netzwerken durchgeführt. Diese bestehen aus zwei *Legacy* Netzwerken (Abschnitt 3.2) und dem VGOS Netzwerk (Abschnitt 3.3) (Behrend et al., 2017). Anzumerken ist, dass die Station Wettzell Teil von beiden *Legacy* Netzwerken ist, jedoch mit unterschiedlichen Antennen.

December 2017

Sunday	Monday	Tuesday	Wednesday	Thursday	Friday	Saturday																																																																																		
		28 	29 	30 	1 	2 																																																																																		
3 	4 	5 	6 	7 	8 	9 																																																																																		
10 	11 	12 	13	14	15	16																																																																																		
17	18	19	20	21	22	23																																																																																		
24	25	26	27	28	29	30																																																																																		
31					<table border="1"> <tr> <td colspan="7">November 2017</td> <td colspan="7">January 2018</td> </tr> <tr> <td></td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td></td><td></td> <td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td> </tr> <tr> <td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td> <td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td>12</td><td>13</td> </tr> <tr> <td>12</td><td>13</td><td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td> <td>14</td><td>15</td><td>16</td><td>17</td><td>18</td><td>19</td><td>20</td> </tr> <tr> <td>19</td><td>20</td><td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td> <td>21</td><td>22</td><td>23</td><td>24</td><td>25</td><td>26</td><td>27</td> </tr> <tr> <td>26</td><td>27</td><td>28</td><td>29</td><td>30</td><td></td><td></td> <td>28</td><td>29</td><td>30</td><td>31</td><td></td><td></td><td></td> </tr> </table>	November 2017							January 2018								1	2	3	4			1	2	3	4	5	6	5	6	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11	12	13	12	13	14	15	16	17	18	14	15	16	17	18	19	20	19	20	21	22	23	24	25	21	22	23	24	25	26	27	26	27	28	29	30			28	29	30	31			
November 2017							January 2018																																																																																	
	1	2	3	4			1	2	3	4	5	6																																																																												
5	6	7	8	9	10	11	7	8	9	10	11	12	13																																																																											
12	13	14	15	16	17	18	14	15	16	17	18	19	20																																																																											
19	20	21	22	23	24	25	21	22	23	24	25	26	27																																																																											
26	27	28	29	30			28	29	30	31																																																																														

Abbildung 3.1: Kalender der CONT17 Kampagne (Nothnagel, 2019)

Die Beobachtungen der beiden *Legacy* Netzwerke wurden über den kompletten Zeitraum der Kampagne durchgeführt, die Beobachtungen mittels des VGOS Netzwerkes jedoch nur im Zeitraum vom 4. bis zum 8. Dezember 2017.

Nachdem im Verlauf der Messkampagne mit drei verschiedenen Netzwerken beobachtet wurde, fand die Korrelation der Beobachtungsdaten an drei unterschiedlichen Standorten statt: Das *Legacy 1* Netzwerk am Korrelator in Bonn, Deutschland, das *Legacy 2* am *Very Long Baseline Array* (VLBA) Korrelator in Socorro, USA und für die VGOS Daten am Observatorium in Haystack, USA (Behrend et al., 2017; Nothnagel, 2019).

Das Ziel der CONT17 Kampagne ist, wie bereits erwähnt, die maximal erreichbare Genauigkeit von VLBI Messungen zu veranschaulichen. Im Zuge dessen sollen zwischen den drei genannten Netzwerken eventuelle systematische Fehler in Bezug auf die unterschiedlichen Werte der geodätischen Produkte (z.B. EOP) aufgedeckt werden. Dies ist möglich, da im gleichen Zeitraum die Parameter von unterschiedlichen Netzwerken gemessen wurden. Außerdem sollen die Möglichkeiten des neueren VGOS Netzwerkes demonstriert werden (Behrend et al., 2017; Nothnagel, 2019). Da an allen teilnehmenden Stationen der CONT17 Kampagne auch GPS Antennen vorhanden sind, können die mit der VLBI beobachteten Werte mit denen der GPS (IGS) Lösungen verglichen werden (Nothnagel, 2019).

3.2 Legacy -1 und -2 Netzwerk

Die beiden *Legacy* Netzwerke beobachten im Gegensatz zu den VGOS Antennen im S- und X-Band und beinhalten jeweils 14 Stationen (Abb. 3.2). Von den 14 Stationen des *Legacy 2* Netzwerkes gehören 10 Stationen der VLBA, USA¹ Anordnung an (Behrend et al., 2017).

¹<https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>

Für die Korrelation wurden die Daten des *Legacy 1* Netzwerkes bis auf zwei Ausnahmen via *e-transfer* zum Korrelator nach Bonn übertragen, die Daten des *Legacy 2* Netzwerkes mussten jedoch physisch zum Korrelator geliefert werden. Die gesamte Prozesskette, vom Zeitpunkt der letzten Beobachtung bis zum Ende der Korrelation, konnte für das *Legacy 2* Netzwerk in 21 Tagen durchgeführt werden. Im Gegensatz dazu dauerte der Ablauf des *Legacy 1* Netzwerkes 77 Tage, was auf Engpässe der Übermittlung via *e-transfer* hindeutet. Das Erstellen des Beobachtungsplanes wurde mit der Nasa Software SKED² durchgeführt (Behrend et al., 2017).

Beobachtet wurde jeden Tag jeweils von 0 bis 24 Uhr, mit einer kurzen Pause von 3 bzw. 5 Minuten, um die Antennen laut dem Beobachtungsplan des neuen Tages auszurichten.

Aufgrund der Nachwirkungen des Hurrikans Maria konnte die Station SC-VLBA (St. Croix, siehe Tabelle 3.2) nicht an der Beobertungskampagne teilnehmen. In der zweiten Beobachtungshälfte kam es zu einem Ausfall der Station SESHAN25 und es konnten daher ab dem Zeitpunkt keine Messungen mehr durchgeführt werden (Tabelle 3.2).

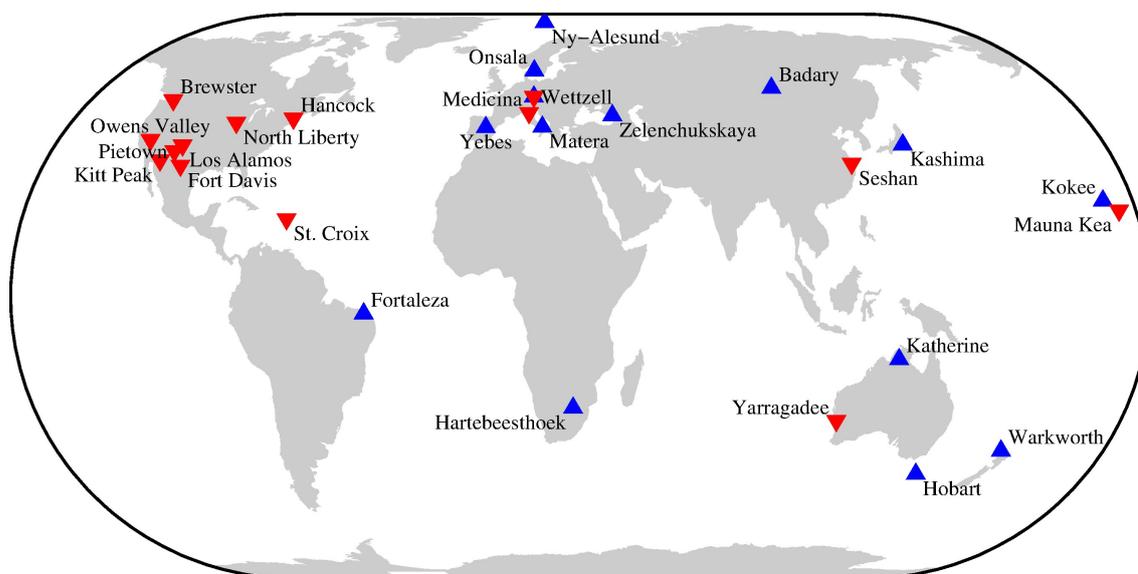


Abbildung 3.2: Cont17 *Legacy 1* (Blau) und *Legacy 2* (Rot) Netzwerk (Nothnagel, 2019)

3.3 VLBI Global Observing System (VGOS) Netzwerk

Aufgrund veralteter Antennen aus den 1960ern und 1970ern wurde es immer schwieriger, den immer besseren Genauigkeitsanforderungen zu genügen (Petrachenko et al., 2012). Im Zuge dessen entwickelte die *Working Group 3* (WG3), die vom IVS im Jahr 2005 akzeptierte Arbeit *VLBI2010: Current and Future Requirements*

²<https://space-geodesy.nasa.gov/techniques/tools/sked/sked.html>

Tabelle 3.1: Stationen des *Legacy 1* Netzwerkes (Nothnagel, 2019)

Name	Code	Name des Observatoriums und Standort
BADARY	Bd	Badary Radio Astronomical Observatory, Russia
FORTLEZA	Ft	Space Radio Observatory of the Northeast (ROEN), Fortaleza, Brazil
HART15M	Ht	Hartebeesthoek Radio Astronomy Observatory, South Africa
HOBART26	Ho	Mt. Pleasant Radio Astronomy Observatory, Hobart, TAS, Australia
KASHIM11	K1	Kashima VLBI Station, Japan
KATH12M	Ke	Katherine Observatory, Katherine, NT, Australia
KOKEE	Kk	Kokee Park Geophysical Observatory, Kauai, HI, USA
MATERA	Ma	Centro di Geodesia Spaziale G. Colombo, Matera, Italy
NYALES20	Ny	Ny Ålesund Geodetic Observatory, Spitsbergen, Norway
ONSALA60	On	Onsala Space Observatory, Sweden
WARK12M	Ww	Warkworth VLBI Station, New Zealand
WETTZELL	Wz	Geodetic Observatory Wettzell, Germany
YEBES40M	Ys	Astronomical Center at Yebes, Spain
ZELENCHK	Zc	Radioastronomical Observatory Zelenchukskaya, Russia

Tabelle 3.2: Stationen des *Legacy 2* Netzwerkes (Nothnagel, 2019)

Name	Code	Name des Observatoriums und Standort
BR-VLBA	Br	VLBA Station, Brewster, WA, USA
FD-VLBA	Fd	VLBA Station, Ft. Davis, TX, USA
HN-VLBA	Hn	VLBA Station, Hancock, NH, USA
KP-VLBA	Kp	VLBA Station, Kitt Peak, AZ, USA
LA-VLBA	La	VLBA Station, Los Alamos, NM, USA
MK-VLBA	Mk	VLBA Station, Mauna Kea, HI, USA
NL-VLBA	Nl	VLBA Station, North Liberty, IA, USA
OV-VLBA	Ov	VLBA Station, Owens Valley, CA, USA
PIETOWN	Pt	VLBA Station, Pie Town, NM, USA
SC-VLBA	Sc	VLBA Station, St. Croix, VI, USA
MEDICINA	Mc	Medicina Radio Astronomy Station, Italy
SESHAN25	Sh	Shanghai Astronomical Observatory, Seshan, China
WETTZ13N	Wn	Geodetic Observatory Wettzell, Germany
YARRA12M	Ya	Yarragadee Observatory, Yarragadee, WA, Australia

for *Geodetic VLBI Systems*. Dieses neue Netzwerk hat den Namen VGOS mit den folgenden Zielen bekommen (Petrachenko et al., 2009; Petrachenko et al., 2012):

- Eine weltweite Positionsgenauigkeit von 1 mm und für Geschwindigkeiten eine Genauigkeit von 0.1 mm/Jahr
- Für die Berechnung von Stationskoordinaten und EOPs kontinuierliche Messungen
- Eine Verfügbarkeit der Messergebnisse innerhalb von 24 Stunden

Da das VGOS Netzwerk für die Auswertung der CONT17 Daten in dieser Arbeit nicht verwendet wird, wird nicht näher darauf eingegangen. Der interessierte Leser sei auf den Bericht von Petrachenko et al. (2009) verwiesen.

3.4 Erwartete Genauigkeit

Um eine Abschätzung zu bekommen, welche Genauigkeit aus der Beobachtung der CONT17 Kampagne zu erwarten ist, wurde die komplette Messkampagne mit dem Programm *solve*³, ähnlich zu VieVS, simuliert. Die berechneten Genauigkeiten werden aber als zu optimistisch angesehen, da keine Geschwindigkeiten der Stationen miteinbezogen wurden. Angegeben wird der formale Fehler der Schätzung der Erdorientierungsparameter. Als Vergleich sind in der Tabelle 3.3 noch die Genauigkeiten der realen Beobachtungen der CONT11 und CONT14 Kampagne angeführt (Behrend et al., 2017).

Tabelle 3.3: Erwartete Genauigkeit (formale Fehler) des CONT17 Netzwerkes aus Simulationen und tatsächliche Genauigkeit der CONT11 und CONT14 Netzwerke. Alle Werte sind in μas bzw. für dUT1 in μs angegeben (Behrend et al., 2017).

Netzwerk	#Stationen	σ_{xp}	σ_{yp}	σ_{dUT1}	σ_{nutdY}	σ_{nutdX}
Legacy 1(XB)	14	13.0	13.7	0.9	14.4	13.1
Legacy 2(XA)	14	15.0	17.5	0.8	15.0	14.3
CONT11	14	12.9	13.1	0.7	13.4	13.8
CONT14	17	12.6	12.3	0.7	14.2	13.2

³<http://astrogeo.org/psolve/>

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Kapitel 4

Auswertung

In diesem Kapitel wird auf die Auswertung mit der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Anwendung VieVS näher eingegangen. Für die Ergebnisse der verschiedenen Auswertungsstrategien siehe Kapitel 5. Die zur Verfügung gestellten Daten sind die der Beobachtungskampagne CONT17 (Kapitel 3). Da für die meisten VGOS Antennen noch keine ausreichend guten *a priori* Koordinaten erhältlich waren, wird nur auf die Auswertung der beiden *Legacy* Netzwerke eingegangen.

Es handelt sich beim *Legacy 1* um das XB- und beim *Legacy 2* um das XA-Netzwerk.

Mit der Software VieVS werden die Beobachtungsdaten der CONT17 Kampagne ausgewertet. Ziel der Auswertung ist es, die Genauigkeit der Erdorientierungsparameter der beiden *Legacy* Netzwerke miteinander zu vergleichen, sowie die unterschiedlichen Zuschläge zu den *a priori* EOP und deren Biases zu bestimmen. Die ausgewerteten Daten werden dann mit der Software MATLAB visualisiert und teilweise in tabellarischer Form miteinander verglichen.

4.1 Single Session

In den folgenden Abschnitten (Abschnitte 4.1 bis 4.3) wird auf die Auswertung mit dem Programm VieVS eingegangen. Zuerst wird die Standardprozedur mit den Standardeinstellungen¹ des Programms VieVS erklärt (Abschnitt 4.1.1) und in den weiteren Kapiteln werden nur noch jene Parameter erklärt, die verändert werden. Die verschiedenen, unten beschriebenen Schritte halten sich, wenn nicht anders angegeben, an den User Guide des VieVS Manuals (VieVs Wiki, 2019).

4.1.1 Standardparameter

Bevor mit der Analyse begonnen werden kann, muss in MATLAB das Programm VieVS aufgerufen werden. Die Daten der Beobachtungskampagne CONT17 liegen in Form von *vgosDB* Files vor, wobei für jeden Tag und für jedes Netzwerk je ein File zur Verfügung steht. Das Format *vgosDB* ist zur Speicherung von geodätischen VLBI Beobachtungen gedacht. Verschiedene Daten werden hier in einzelnen Files gespeichert, wie z.B. der beobachtete Zeitunterschied und stationsspezifische Daten.

¹im weiteren Verlauf der Diplomarbeit Standardparameter genannt.

Diese einzelnen Files werden zu einem System mit verschiedenen Ordnern zusammengefügt, genannt *vgosDB* (VieVs Wiki, 2019).

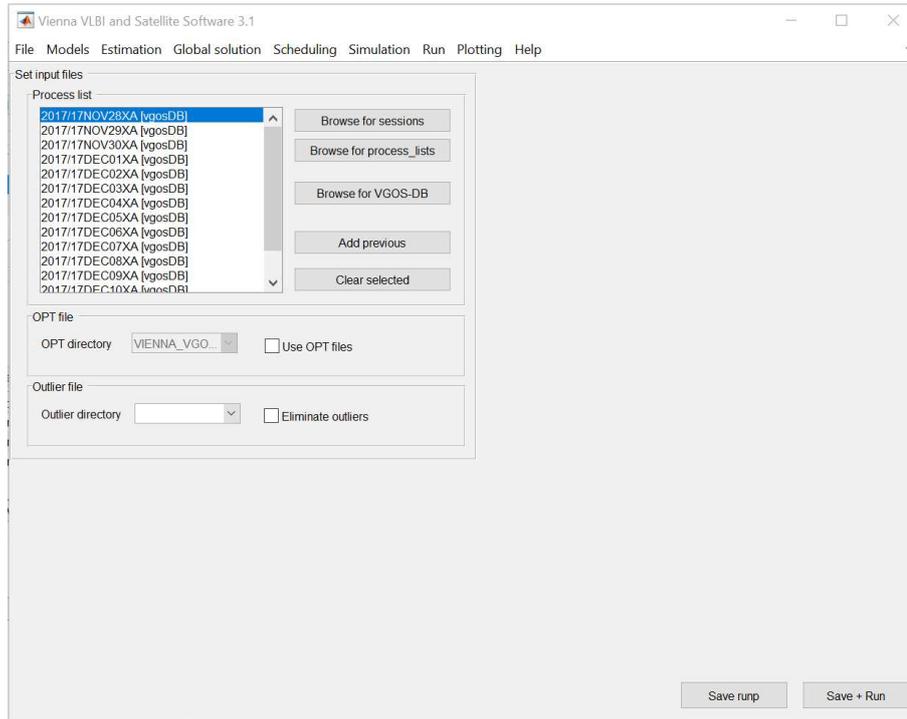


Abbildung 4.1: Startseite des Programms VieVS

Diese Files können ganz einfach im Startfenster von VieVS (Abb. 4.1) über *File/Set input files* eingelesen werden. Damit die Analyse nicht für jedes File einzeln durchgeführt werden muss und diese einzeln eingelesen werden, können sogenannte *process lists* erstellt werden. Damit werden die einzelnen Files für jedes Netzwerk zu einer gemeinsamen Liste zusammengeführt.

In den *OPT* Files können verschiedene Informationen über eine Session gespeichert werden. Hier wird z.B. eine Referenzuhr sowie sogenannte *clock breaks* gesetzt. Basislinien, Stationen und Quellen können in der Datei außerdem von der Beobachtung ausgeschlossen werden. Im ersten Durchgang wurden keine Veränderungen der *OPT* Files getätigt, lediglich die Voreinstellungen, wie z.B. schon voreingestellte *clock breaks*, wurden belassen (Abb. 4.2). Die voreingestellten *OPT* Files wurden vom Forschungsbereich Höhere Geodäsie an der TU Wien zur Verfügung gestellt und stellen die Standardparameter dar. Das *OPT* File kann durch Setzen eines Häkchens auf der Startseite verwendet werden (Abb. 4.1).

Außerdem wurde für jeden Tag ein *outlier* File erstellt. In diesem File stehen pro Zeile Ausreißer-Beobachtungen, die vorher detektiert werden mussten. Die Detektion der Ausreißer erfolgte mittels der Funktion *Simple outlier test* unter dem Reiter *Run/VieVS estimation settings*. Ein einfacher Ausreißertest heißt, dass Beobachtungen, die größer als c mal der *a posteriori* Standardabweichung der Gewichtseinheit m_0 sind, eliminiert werden ($-c \cdot m_0$). Der Parameter c ist eine Größe, die vom User gesetzt wird und wurde beim Standardwert von 5 belassen. Zum Eliminieren der Ausreißer muss das Programm einmal zum Detektieren dieser Ausreißer und ein zweites Mal mittels der Option *Eliminate outliers* (Abb. 4.1) zum Entfernen dieser ausgeführt werden.

```

1  CLOCK BREAKS: 2
2  YARRA12M  58088.673212
3  KP-VLBA   58088.918900
4  STATIONS TO BE EXCLUDED: 0
5  BASELINES TO BE EXCLUDED: 0
6  SOURCES TO BE EXCLUDED: 0
7  STATIONS TO BE DOWN-WEIGHTED: 0
8  NO CABLE CAL: 0
9

```

Abbildung 4.2: Beispiel eines *OPT* Files anhand der Session 17DEC01XA (Beobachtung des *Legacy 2* Netzwerkes am 01.12.2017), es werden hier zwei *clock breaks* gesetzt

Die übrigen Parameter unter *Models* und *Estimation* wurden für diesen Durchlauf bei den Standardparametern belassen. Unter dem Reiter *Run/Run options* mussten nun die Module VIE_INIT, VIE_MOD und VIE_LSM (Abschnitt 2.2) ausgewählt werden und der erste Durchlauf konnte gestartet werden. Das Ergebnis der Berechnung wird von dem Programm in verschiedenen Ordnern gespeichert:

- **LEVEL0:** Das Ergebnis der Initialisierung des Moduls VIE_INIT. Hier werden verschiedene Informationen über die Antennen, gewählte Parameter im Startfenster, wie z.B. die *OPT* und *outlier* Files sowie die gewählten Parameter für die Berechnung des Modells unter dem Reiter *models*, gespeichert. Ebenfalls werden Parameter der Beobachtung und alle verfügbaren Informationen über die Quellen gespeichert. In diesem Modul werden noch keine Berechnungen durchgeführt, sondern lediglich die Daten eingelesen.
- **LEVEL1:** Die Ausgabe der Berechnung des Moduls VIE_MOD. Es handelt sich um die gleichen Files, wie in LEVEL0. Jedoch wird der Inhalt dieser mit der Berechnung des theoretischen Zeitunterschiedes (Abschnitt 2.1.3), den partiellen Ableitungen als Input für VIE_LSM, den Korrekturen der Stationen und der Berechnung der Erdorientierung (Abb. 4.3), aktualisiert.
- **LEVEL2:** Die Ergebnisse der Normalgleichungsmatrizen des Moduls VIE_LSM für das Modul VIE_GLOB (Abschnitt 2.1.5). Ergebnisse der globalen Lösung werden in *VieVS/OUT/GLOB/_ESTIMATES/TEST_OUT/* gespeichert. Für die Berechnung der globalen Lösung mit den CONT17 Daten siehe Abschnitt 4.2.
- **LEVEL3:** Die Ergebnisse des Moduls VIE_LSM. Die eigentlichen Ergebnisse der Ausgleichung werden als *x_.mat* File gespeichert (Abschnitt 2.1.4).
- **LEVEL4:** Die Ergebnisse des Moduls VIE_SIM. Das Modul wurde für diese Diplomarbeit nicht verwendet.
- **LEVEL5:** Die Ergebnisse des Moduls VIE_SCHED. Das Modul wurde für diese Diplomarbeit nicht verwendet.

Die ausgeglichenen Erdorientierungsparameter können über die Funktion *Plotting/EOP/BAS out* aus den *x_.mat* File des Ordners LEVEL3 herausgelesen und in einem eigenen File gespeichert werden (Abb. 4.7). In der ersten Spalte des *output*

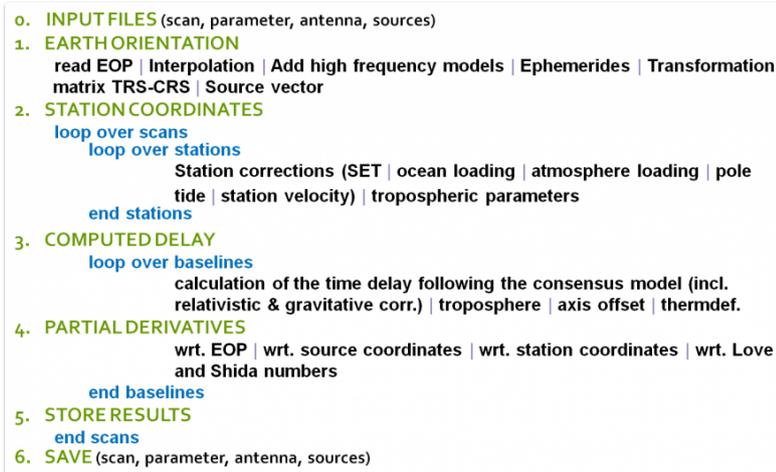


Abbildung 4.3: Flowchart Diagramm des Moduls VIE_MOD (VieVs Wiki, 2019)

Files befindet sich der Beobachtungszeitpunkt im modifizierten julianischem Datum (mjd). Die darauffolgenden Spalten beinhalten die Absolutwerte der EOP, *a priori* Werte der EOP, geschätzte Zuschläge zu den *a priori* Werten, den formalen Fehler der Ausgleichung und hochfrequente EOP Korrekturen.

Das angefertigte EOP File (Abb. 4.7) kann nun über ein MATLAB Skript graphisch dargestellt werden. Mittels dieses Skriptes können die einzelnen Erdorientierungsparameter, berechnet aus den beiden Netzwerken, miteinander verglichen werden. Auf der y-Achse befinden sich die Zuschläge zu den *a priori* Werten, auf der x-Achse das Datum der Beobachtung im Format mm/dd. Die Pol- und Nutationsparameter werden in der Einheit μas angegeben, dUT1 jedoch in μs . Die grünen Punkte im Plot stellen den jeweiligen geschätzten Zuschlag pro Tag dar und die vertikalen Striche repräsentieren die sogenannten *error bars*. Diese sind die berechneten formalen Fehler der Ausgleichung, auch Standardabweichung (SD^2) genannt.

Folgendes gilt für die Visualisierungen der Erdorientierungsparameter zu beachten: Der berechnete Zuschlag zu den *a priori* Werten der *single session* Lösung wird immer für 12:00 Uhr mittags ausgegeben. Das heißt, dass der zum Beispiel für den 28.11. berechnete Wert für den 28.11. um 12:00 mittags ausgegeben wird. Im Gegensatz dazu werden die Zuschläge mit der globalen Lösung (Abschnitt 4.2) immer für 0:00 Mitternacht berechnet. Ein Vergleich der globalen mit der Einzellösung ist daher nur bedingt möglich.

In den folgenden Unterkapiteln werden verschiedene Auswertungsstrategien angewandt und soweit nicht anders angegeben, wird immer nach der Vorgehensweise wie in Abschnitt 4.1.1 beschrieben vorgegangen.

4.1.2 Ausschluss von Stationen

Für diesen Versuch wurden, aufgrund von Ausreißern der Lösung mit den Standardparametern (Abschnitt 5.1.1), nacheinander einige Stationen des XB-Netzwerkes

²engl. *standard deviation*

am 12. Dezember von der Parameterschätzung ausgeschlossen. Unter dem Punkt *stations to be excluded* in den *OPT* Files (Abb. 4.2) können Stationen von der Beobachtung ausgeschlossen werden. Bei den nicht an der Beobachtung teilnehmenden Stationen handelte es sich um HOBART26, KASHIM11 und ZELENCHK. In der weiteren Auswertung wurde die Station HOBART26 am 12.12.2017 immer über die *OPT* Files ausgeschlossen (eine Erklärung dazu befindet sich in Abschnitt 5.1.2.1).

4.1.3 Troposphäre

Im nächsten Versuch wurde das Schätzintervall des feuchten Anteils der Troposphäre angepasst. Für das Modul VIE_MOD wird der hydrostatische Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung nach der Formel von Saastamoinen (1972) (Gleichung (2.22)) berechnet. Der feuchte Anteil wird im Zuge der Ausgleichsrechnung mitgeschätzt. Die ausgewählten *Mapping Functions* waren die VMF3 (Landskron und Böhm, J., 2018b). Die Gradienten wurden für die erste Auswertung nicht als *a priori* Werte eingeführt, sondern mittels des Moduls VIE_LSM geschätzt.

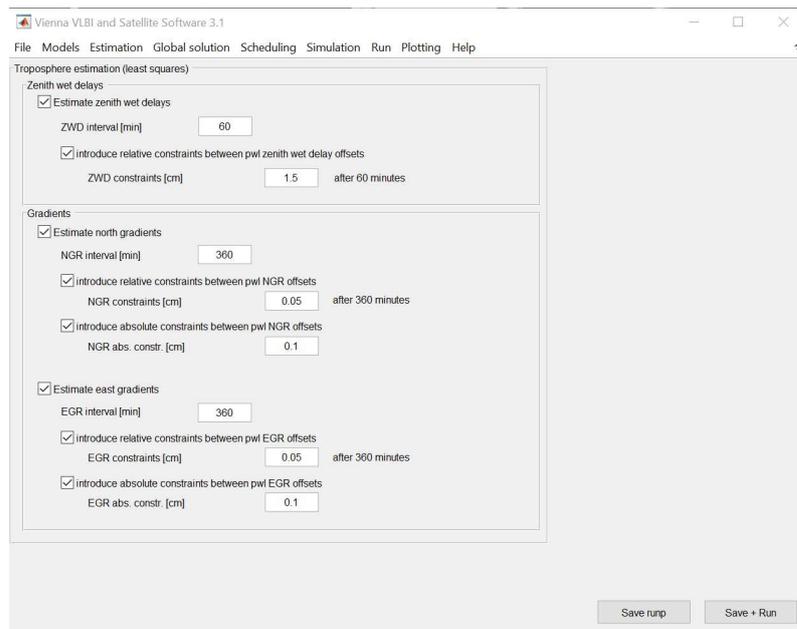


Abbildung 4.4: VieVS Fenster für die Einstellungen der Schätzung der Troposphäre, hier noch mit den Standardeinstellungen dargestellt

Der feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung im Zenit, sowie die Gradienten in Nord- und Ostrichtung werden als CPWLO geschätzt (Abschnitt 2.1.4). Ein Beispiel, wie der feuchte Anteil $\Delta\tau_{tropo}^{wet}$ mit den CPWLO geschätzt wird, wird in der Gleichung (4.1) gezeigt. An einem Zeitpunkt t der Beobachtung wird mittels der CPWLO Funktionen x_1 und x_2 des feuchten Anteils in Zenitrichtung zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 die geneigte feuchte Verzögerung $\Delta\tau_{tropo}^{wet}$ beschrieben. Zwischen den beiden Zeitpunkten t_1 und t_2 wird die *Mapping Function* des feuchten Anteils zum Zeitpunkt t beschrieben (Teke, 2011). Für die anderen Parameter, die mittels CPWLO berechnet werden können, wird nach dem selben Prinzip vorgegan-

gen (Böhm, J. und Schuh, 2013).

$$\Delta\tau_{tropo}^{wet} = m_w(t)x_1 + m_w(t)\frac{t - t_1}{t_2 - t_1}(x_2 - x_1) \quad (4.1)$$

Der feuchte Anteil der troposphärischen Laufzeitverzögerung wurde, statt der Standardeinstellung alle 60 Minuten, alle 30 Minuten geschätzt. Die Gradienten in Nord- und Ostrichtung wurden alle 180, statt alle 360 Minuten geschätzt.

4.1.4 Nutation fixiert

Im nächsten Versuch wurden die Erdorientierungsparameter ohne die Nutationsparameter geschätzt. Hierfür musste lediglich in den Einstellungen zur Schätzung der EOP (Abb. 4.5), das Häkchen für *Estimate nutdx/nutdy* entfernt werden. Die Nutationsparameter sind in diesem Beispiel nicht geschätzt worden, sondern wurden auf die *a priori* Werte fixiert. Die Einstellungen die Station HOBART26 vom 12.12.2017 auszuschließen und den feuchten Anteil der Troposphäre alle 30 Minuten, sowie die Gradienten in Nord- und Ostrichtung alle 180 Minuten zu schätzen, wurden für diese Berechnung beibehalten.

	estimation interval [min]	relative		
<input checked="" type="checkbox"/> Estimate Xpol (inter. pole coord. in TRF)	1440	<input checked="" type="checkbox"/> constraints [mas]	1.0e-4	after 1440 minutes
<input checked="" type="checkbox"/> Estimate Ypol (inter. pole coord. in TRF)	1440	<input checked="" type="checkbox"/> constraints [mas]	1.0e-4	after 1440 minutes
<input checked="" type="checkbox"/> Estimate dUT1 (rotation angle)	1440	<input checked="" type="checkbox"/> constraints [mas]	1.0e-4	after 1440 minutes
<input checked="" type="checkbox"/> Estimate nutdx (CIP coord. in celes. long.)	1440	<input checked="" type="checkbox"/> constraints [mas]	1.0e-4	after 1440 minutes
<input checked="" type="checkbox"/> Estimate nutdy (CIP coord. in obliquity)	1440	<input checked="" type="checkbox"/> constraints [mas]	1.0e-4	after 1440 minutes

Abbildung 4.5: VieVS Fenster für die Einstellungen der Schätzung der Erdorientierungsparameter, hier noch mit den Standardeinstellungen gezeigt

4.2 Globale Lösung

Für die Berechnung der globalen Lösung musste zuerst eine *single session* Auswertung mit den Parametern aus Abschnitt 4.1.2 und Abschnitt 4.1.3 durchgeführt werden. Dies wird benötigt, um die Normalgleichungsmatrizen N und die Vektoren b der *single session* für die Berechnung der globalen Lösung vorzubereiten (für eine genauere Beschreibung des mathematischen Hintergrunds siehe Abschnitt 2.1.5). Im Gegensatz zu einer *single session* müssen die relativen Zwänge zur Schätzung der EOP gelockert werden. Statt der Standardparameter von $1 \cdot 10^{-4}$ Millibogensekunden (mas) wurden die *constraints* (Zwänge) mit 2 mas festgesetzt. Das Schätzintervall der EOP wurde bei 1440 Minuten belassen.

Lockere Zwänge dienen dazu, in der gemeinsamen Ausgleichung aller Sessions, nicht die gleichen Werte für den kompletten Beobachtungszeitraum zu bekommen. Die EOP werden in der globalen Lösung aus überlappenden Zeitpunkten geschätzt.

In der *single session* werden strengere Zwänge gesetzt, um zu garantieren, dass alle Schätzwerte pro Session (Tag) gleich sind (VieVs Wiki, 2019).

Normalerweise wird die globale Lösung zur Festlegung von einem terrestrischen oder himmelfesten Referenzrahmen verwendet. Der Algorithmus kann aber auch für die Bestimmung der Erdorientierungsparameter angewendet werden, wie es in dieser Diplomarbeit der Fall ist, wenn der Zeitraum über den sich die Sessions erstrecken nicht zu lange ist.

Nachdem die *single sessions* berechnet wurden, konnte mit der Berechnung der globalen Lösung begonnen werden. In VieVS muss zuerst unter *Global solution/Select parameters* festgelegt werden, welche Parameter geschätzt werden, welche auf ihre *a priori* Werte fixiert werden und welche reduziert werden sollen (Abb. 4.6).

The screenshot shows the 'Global solution' window in VieVS. It is divided into two main sections: 'Vie_glob parameters' and 'Other options'.

Vie_glob parameters: This section contains a table with three columns: 'estimate', 'fix', and 'reduce'. Each parameter has a radio button in one of these columns to indicate its status.

Parameter	estimate	fix	reduce
clock	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
zenith wet delay	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
troposphere gradients	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
antenna coordinates	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
antenna velocities	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
source coordinates	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
xpol	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
ypol	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
dUT1	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
dX	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
dY	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

Other options: This section contains additional settings:

- Max RMS (a posteriori variance of unit weight): A text input field containing the value '2'. Below it, a note states: 'Applicable ONLY if you estimate parameters in VIE_LSM'.
- Save data for a backward solution of session-wise reduced parameters into VIEVS/OUT/GLOB/BACKWARD_DATA & RUN: An unchecked checkbox.

Abbildung 4.6: VieVS Fenster für die Einstellungen der globalen Parameter

Die feuchte Laufzeitverzögerung im Zenit, die troposphärischen Gradienten in Nord- und Ostrichtung, sowie die Uhrenparameter waren die zu reduzierenden Parameter der globalen Lösung. Diese Parameter sind für einen endlichen Zeitraum gültig und können daher nur aus einer *single session* berechnet werden (für eine genauere Beschreibung der globalen Lösung siehe Abschnitt 2.1.5). Die Quellenkoordinaten wurden auf ihre *a priori* Koordinaten festgesetzt. Bei den zu schätzenden Parametern handelte es sich um die fünf Erdorientierungsparameter, sowie die Stationskoordinaten.

Unter *Global solution/TRF/CRF parameterization* muss noch ein Datum für die Bedingung der *no-net-translation (NNT)* und *no-net-rotation (NNR)* definiert werden. Das Datum des XA- und XB-Netzwerkes (Tabelle 4.1) wurde durch die Auswahl von Stationen, die keine Sprünge in den x-, y- und z-Koordinaten haben, definiert. Um zu kontrollieren welche Stationen Sprünge in den Koordinaten haben, können in VieVS unter *Plotting/Parameters* die jeweiligen Zuschläge zu den x-, y- und z-Koordinaten nachgeschaut werden. Wichtig für die Berechnung der globalen Lösung

Tabelle 4.1: Datumsdefinierende Stationen des XA- (*Legacy 2*) und XB-Netzwerkes (*Legacy 1*)

Datum XA	Datum XB
BR-VLBA	BADARY
FD-VLBA	HOBART26
HN-VLBA	KATH12M
KP-VLBA	KOKEE
LA-VLBA	MATERA
MK-VLBA	NYALES20
NL-VLBA	ONSALA60
OV-VLBA	WARK12M
PIETOWN	WETTZELL
SESHAN25	YEBES40M

ist es unter *Run/Run options* das richtige Verzeichnis für die vorher in der *single session* berechneten Normalgleichungsmatrizen anzugeben. Die berechneten globalen Parameter werden in einer gemeinsamen Datei ausgegeben. Außerdem werden von dem Modul noch einige Abbildungen erstellt. Eine dieser Abbildungen zeigt, welche Stationen zu welcher Session an der Berechnung teilgenommen haben, sowie eine Karte der teilgenommenen Stationen inklusive extra Markierung der datumsdefinierenden Stationen.

Die Berechnung der globalen Lösung wurde in einem weiteren Versuch ohne Schätzung der Nutationsparameter (vergleiche Abschnitt 4.1.4) ausgeführt.

Die Erdorientierungsparameter wurden in einem letzten Test in der globalen Lösung, statt wie in der oben beschriebenen Version einmal am Tag, nun alle 60 Minuten geschätzt. Wenn die EOP in einem Intervall niedriger als einen Tag geschätzt werden, kommt es zu einer hohen Korrelation zwischen den Polparametern und den Nutationsparametern (*celestial pole offsets*) (Gross, 2007). Um dies zu vermeiden werden für diesen Arbeitsschritt die Nutationsparameter auf ihre *a priori* Werte festgesetzt (Nilsson et al., 2019).

4.3 Vergleich der EOP von beiden Netzwerke

Für diesen Teil der Auswertung wird auf die Berechnung der Abweichungen der Zuschläge der Erdorientierungsparameter zu ihren *a priori* Werten der beiden Netzwerke, kurz Bias, eingegangen. In MATLAB wurden die ausgewerteten Daten, die in den vorherigen Kapiteln beschrieben sind, miteinander verglichen. Zur Beschreibung des Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk wurden die Differenzen der Zuschläge zu den *a priori* EOP einzelner Tage, der Mittelwert μ (Gleichung (4.2)) der Differenzen von allen Tagen, sowie die Standardabweichung σ (Gleichung (4.3)) der Differenzen von allen Tagen, berechnet. A beschreibt hier den Vektor der Variablen und N die Anzahl an Beobachtungen. Die Differenz der beiden Netzwerke des Zuschlags zu einem der fünf EOP ist daher in A gegeben. N ist in dem Fall

der CONT17 Beobachtungen 15. Im Idealfall sollten sich die Zuschläge zu den Erdorientierungsparametern, berechnet mit den beiden einzelnen Netzwerken kaum voneinander unterscheiden. Dies ist in der Realität nicht der Fall, da die berechneten Zuschläge unter anderem von der Geometrie der Verteilungen der beobachtenden Stationen abhängen.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N A_i \quad (4.2)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |A_i - \mu|^2} \quad (4.3)$$

Folgende Biases wurden in dieser Diplomarbeit berechnet:

- Biases mit den Standardparametern (Abschnitt 4.1.1)
- Biases mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre im Zenit alle 30 Minuten (Abschnitt 4.1.3)
- Biases der globalen Lösung (Abschnitt 4.2)
- Biases der globalen Lösung mit Fixierung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 4.2)
- Biases Vergleich der globalen Lösung (Abschnitt 4.2) mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre im Zenit alle 30 Minuten (Abschnitt 4.1.3)
- Biases der globalen Lösung mit Fixierung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte mit einem Schätzintervall der Erdrotationsparameter (ERP) von 60 Minuten (Abschnitt 4.2)

4.4 Zusammenhang Stationskoordinaten mit EOP

Um herauszufinden, ob ein Zusammenhang zwischen den Stationskoordinaten und den Erdorientierungsparametern besteht, wurden beide in einem gemeinsamen Plot dargestellt. Sowohl für die Stationskoordinaten als auch für die EOP wurden die Zuschläge zu den *a priori* Werten dargestellt. Es wurden jeweils die einzelnen Koordinaten von beiden Netzwerken miteinander auf einer Abbildung dargestellt und mit den fünf EOP verglichen. Für diese Auswertung wurden die Berechnungen mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abschnitt 4.1.3) und die der globalen Lösung (Abschnitt 4.2) herangezogen.

4.4. ZUSAMMENHANG STATIONSKOORDINATEN MIT EOP

```

Columns:
1 .... MJD
2-6 .... total values(x,y,ut,dx,df)
12-16 .... a priori EOP (input in wrt_mod)
17-21 .... error of estimation
22-24 .... high frequency (subdaily) ERF corrections
All units in mas resp. ms (ducl)
MJD spol ypol dnu1 dx dy x_spr y_spr ut_spr dx_spr dy_spr x_est y_est dnu1_est dx_est dy_est x_err y_err ut_err dx_err dy_err x_hf y_hf
58095.4989 130.082313 236.432222 250.141877 0.506870 -0.119090 129.568872 236.778162 252.151450 0.342127 -0.064330 0.125441 -0.345939 -0.0109573 0.164743 -0.074760 0.055067 0.042843 0.003590 0.062615 0.071690 -0.257163
58096.4996 127.673862 236.695945 250.752208 0.306935 -0.104344 127.575036 237.134760 250.765323 0.168253 -0.028635 0.098526 -0.239315 -0.013115 0.136661 -0.070509 0.027502 0.032356 0.002852 0.036540 0.054960 -0.321632
58097.4959 125.565075 236.742852 246.278183 0.133364 -0.115663 125.220165 236.962231 249.275639 0.004550 0.344811 -0.219649 0.344811 -0.02484 0.162460 -0.112024 0.029618 0.036348 0.002317 0.101752 0.045619 -0.351226
58098.4979 122.979027 236.308855 241.721724 0.288060 0.017468 122.906944 236.561053 247.745632 -0.015502 0.000004 0.071083 -0.251168 -0.023907 0.303562 0.017454 0.030222 0.035597 0.005443 0.068464 0.085117 -0.331425
58099.4982 120.748866 235.896112 246.226270 0.196701 0.050282 120.445992 236.000116 246.268060 0.117393 -0.006467 0.302573 -0.014104 -0.041590 0.073008 0.089749 0.026608 0.029506 0.002182 0.061831 0.052234 -0.263373
58099.4980 118.395800 235.148519 244.80521 0.133822 0.057753 118.053673 235.205818 244.514965 0.263126 -0.016680 0.345127 -0.060959 -0.034443 -0.123304 0.074433 0.026092 0.033189 0.001975 0.041816 0.052234 -0.185611
58099.4980 116.043800 234.402026 243.284026 0.071226 0.118463 115.701506 234.584806 242.671624 0.234336 -0.021136 0.103544 -0.100416 -0.031960 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444
58099.4980 113.691818 233.654274 242.254908 0.371232 -0.186459 113.329100 234.446235 242.671624 0.234336 -0.021136 0.103544 -0.100416 -0.031960 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444 0.025444
58099.4978 111.318027 233.405463 241.285794 0.294666 -0.081745 111.087793 233.375523 241.285794 0.230976 -0.024454 0.231935 0.023941 -0.026399 0.067790 -0.082521 0.039469 0.042259 0.003555 0.039626 0.041643 0.139773
58099.4978 106.176772 233.357952 240.029441 0.377156 -0.182153 108.034591 233.439786 240.038226 0.228976 -0.028992 0.289116 0.081805 -0.04185 0.148180 -0.152161 0.021138 0.039547 0.002332 0.034510 0.059324 0.135445
58099.4978 104.085639 234.094868 237.250468 0.599500 -0.417016 105.781754 233.607288 238.741042 0.227110 -0.038528 0.394418 -0.131855 -0.04729 0.373390 -0.183488 0.028501 0.044231 0.004434 0.040585 0.075026 0.089775
58097.4981 101.789001 234.524818 236.843013 0.288527 -0.228574 103.706744 234.311157 237.852061 0.224506 -0.036522 0.379585 -0.216239 -0.061564 0.061021 -0.151722 0.027602 0.039704 0.001630 0.036516 0.028836 0.010200
58099.4980 99.064423 235.558002 234.43338 0.264633 -0.054167 101.379529 235.027566 235.895656 0.221597 -0.041127 0.142606 -0.267407 -0.021519 0.073517 0.004444 0.027062 0.039599 0.001661 0.03382 0.032131 -0.094136
58099.4980 96.041684 236.267716 235.02369 0.047800 -0.119596 96.531637 236.370879 235.043433 0.217969 -0.047937 0.252467 -0.103463 -0.017090 -0.071129 0.004444 0.027062 0.039599 0.001661 0.03382 0.032131 -0.094136

```

Abbildung 4.7: Ausgabedatei der Erdorientierungsparameter

Kapitel 5

Ergebnisse

In diesem Kapitel wird auf die Ergebnisse der im Kapitel 4 ausgewerteten Daten eingegangen. Zuerst wird in Abschnitt 5.1 auf die Ergebnisse der *single sessions*, dann in Abschnitt 5.2 auf die globale Lösung (*global solution*) eingegangen. Im Weiteren werden in Abschnitt 5.3 die Ergebnisse der Bias behandelt. Im letzten Teil Abschnitt 5.4 wird noch auf mögliche Zusammenhänge zwischen den Stationskoordinaten und den Erdorientierungsparametern eingegangen.

5.1 Single Sessions

Im folgenden Abschnitt wird auf die Ergebnisse der Zuschläge zu den *a priori* Erdorientierungsparametern mit der *single session* Lösung eingegangen.

5.1.1 Standardparameter

In Abb. 5.1 sind die Ergebnisse aus den Lösungen mit der Standardparametrisierung mit dem Programm MATLAB visualisiert. Bei erster Betrachtung fällt sofort auf, dass sich der Zuschlag zu den Nutationsparametern (Abb. 5.1c und 5.1d) und zum dUT1 Parameter (Abb. 5.1e) vom 12.12., berechnet mit dem XB-Netzwerk, stark von den übrigen Tagen unterscheidet. Der Wert für die x-Koordinate der Nutation (Abb. 5.1c) liegt hier bei ca. $-700 \mu s$, für die y-Koordinate (Abb. 5.1d) schon bei fast $-3000 \mu s$. Die Standardabweichung der y-Koordinate liegt an dem Tag bei ca. $-1100 \mu s$ und ist damit mehr als drei Mal so groß, wie der nächst größere Wert vom 10.12.

Der Zuschlag für den dUT1 Wert (Abb. 5.1e) am 12.12. liegt zwar nur bei ca. $-82 \mu s$, jedoch unterscheidet sich dieser von den mit dem XA-Netzwerk berechneten Wert um ca. $60 \mu s$. Weiters ist die berechnete Standardabweichung mit $25 \mu s$ fast dreimal so groß, wie der am nächsten liegende Wert vom 9.12. mit $9 \mu s$. Der Ausreißer vom 12.12. schlägt sich jedoch nicht auf die beiden terrestrischen Polkoordinaten (Abb. 5.1a und 5.1a) nieder. Hier sind speziell für den 12.12. keine Auffälligkeiten erkennbar.

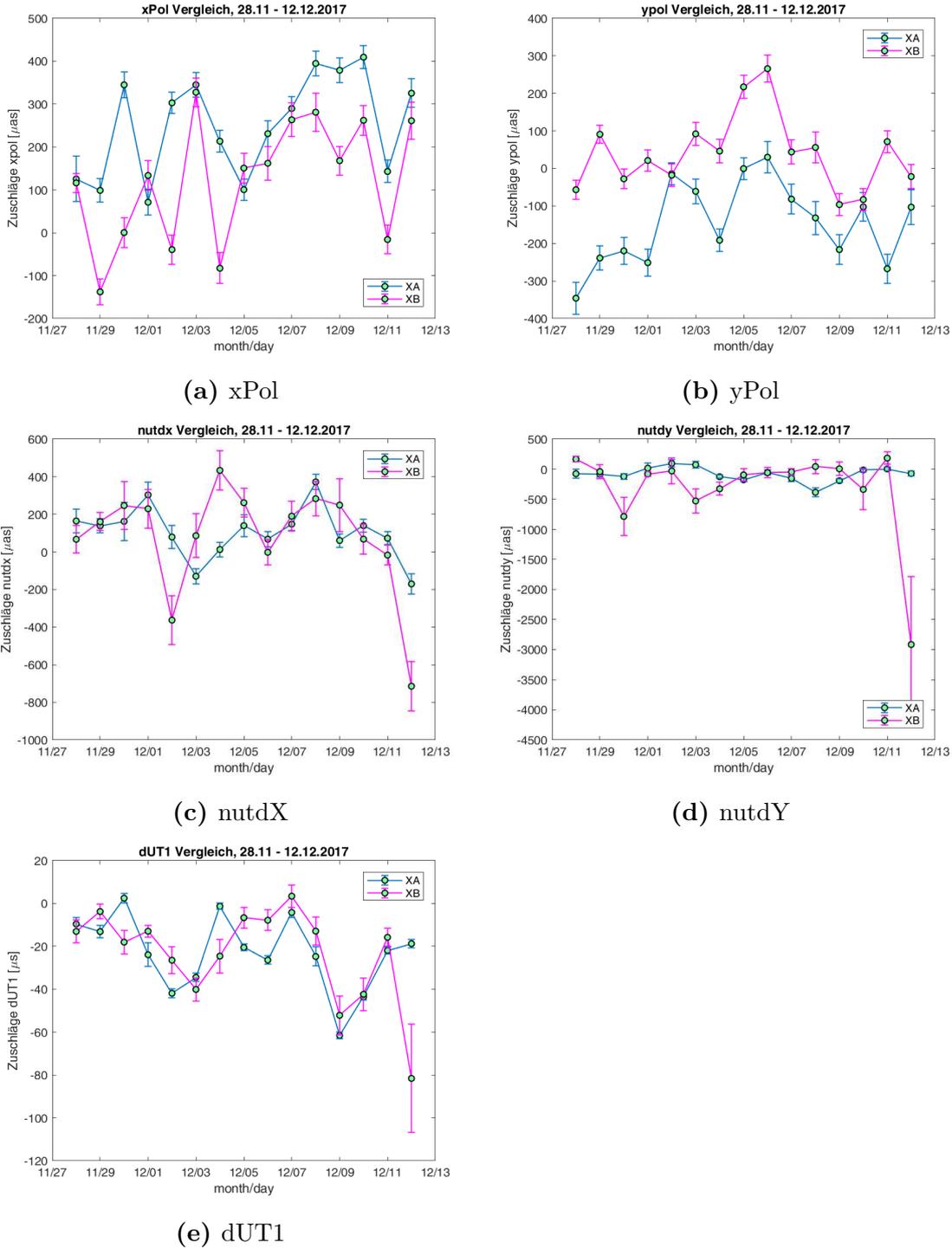


Abbildung 5.1: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter aus den Lösungen mit Standardparametern (Abschnitt 4.1.1).

5.1.2 Ausschließen von Stationen

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse mit dem Ausschluss von verschiedenen Stationen des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017. Die anschließenden Ergebnisse der Erdorientierungsparameter erfolgten jeweils mit dem Ausschluss von entweder der Station HOBART26 (Abschnitt 5.1.2.1), KASHIM11 (Abschnitt 5.1.2.2), oder ZE-

LENCHK (Abschnitt 5.1.2.3). Die drei Stationen wurden aufgrund ihrer jeweils größten Residuen der Ausgleichsrechnung ausgewählt.

5.1.2.1 HOBART26

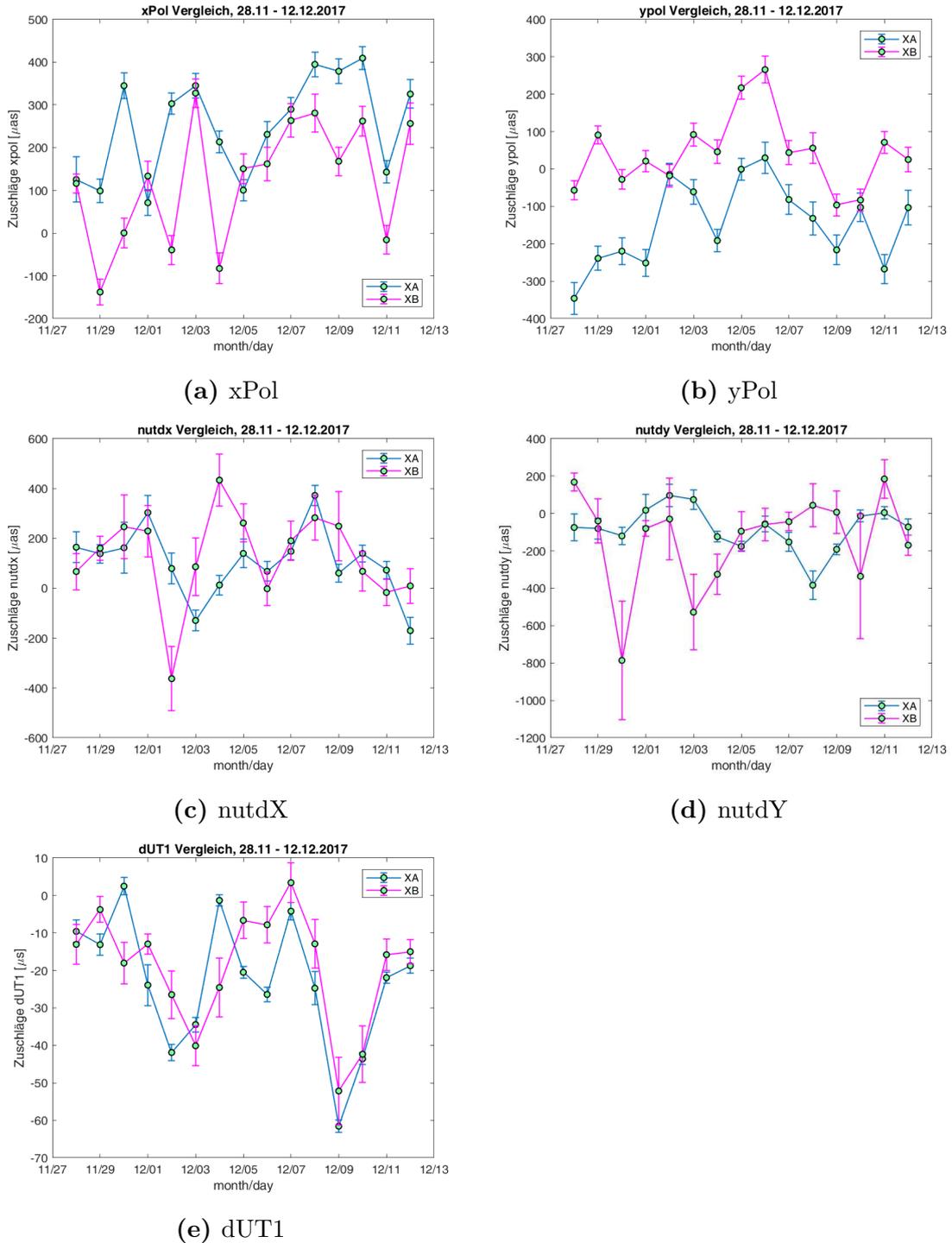


Abbildung 5.2: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station HOBART26 des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)

Wie in Abschnitt 5.1.1 beschrieben, weicht der Zuschlag zu den *a priori* Nutationsparametern, sowie zum dUT1 Parameter vom 12.12. mit dem XB-Netzwerk stark von den anderen Tagen ab. Die Abbildung 5.2 zeigt die Ergebnisse der Berechnung, mit Ausschluss der Station HOBART26 des XB-Netzwerkes vom 12.12. Der Zuschlag zu dem dUT1 Parameter ändert sich von ca. $-82 \mu s$ (Abb. 5.1e) auf ca. $-15 \mu s$ (Abb. 5.2e). Der Unterschied zum Zuschlag des XA-Netzwerkes kann somit verringert werden. Des Weiteren fällt die deutlich niedrigere berechnete Standardabweichung von $\sim 3 \mu s$ auf. Dies ist eine Verbesserung von ca. 88 % zu dem mit den Standardparametern berechneten Wert.

Die Werte der Nutationsparameter in x- und y-Richtung verringern sich, für den 12.12. mit den Zuschlägen von $\sim 10 \mu s$ (x) und $\sim -170 \mu s$ (y), noch auffallender (Abb. 5.2c und 5.2d). Die Standardabweichung des Zuschlages verbessert sich in x-Richtung von $132 \mu s$ auf $69 \mu s$ und in y-Richtung von $\sim 1132 \mu s$ auf $\sim 54 \mu s$. Speziell in der y-Komponente ergibt das eine prozentuale Abnahme von fast 95 %.

Für die x- und y-Polkoordinate (Abb. 5.2a und 5.2b) gibt es für den 12.12. des XB-Netzwerkes, durch den Ausschluss der Station HOBART26, nur geringe Änderungen. Der Zuschlag der x-Polkoordinate kann von $\sim 261 \mu s$ (Standardparameter, Abb. 5.1a) auf $\sim 257 \mu s$ (Abb. 5.2a) verringert werden. In y-Richtung ändert sich dieser von $\sim -22 \mu s$ (Standardparameter, Abb. 5.1b) auf $\sim 25 \mu s$ (Abb. 5.2b).

Da die Station HOBART26 nur vom letzten Tag (12.12.) der Beobachtungskampagne ausgeschlossen wurde, ändern sich die übrigen Tage im Vergleich zur Lösung mit den Standardparametern (Abschnitt 5.1.1) nicht.

5.1.2.2 KASHIM11

Das Ausschließen der Station KASHIM11 bewirkt für den dUT1 Parameter eine Vergrößerung des Zuschlages am 12.12. (Abb. 5.3e), im Gegensatz zu der Berechnung mit den Standardparametern (Abb. 5.1e). Dieser ändert sich um $\sim -10 \mu s$ auf $\sim -90 \mu s$. Ebenfalls vergrößert sich die Standardabweichung des Zuschlages um $\sim 22 \mu s$ auf $\sim 25 \mu s$.

Die Zuschläge zu den Nutationsparametern (Abb. 5.3c und 5.3d) werden zwar im Vergleich zum Ergebnis mit den Standardparametern (Abschnitt 5.1.1) in x-Richtung (Abb. 5.1c) um $\sim 49 \mu s$ kleiner, in y-Richtung jedoch (Abb. 5.1d) um $\sim 514 \mu s$ größer. Im Vergleich zum Ausschluss der Station HOBART26 (Abb. 5.2c und 5.2d) sind die Zuschläge dennoch in beiden Richtungen erheblich größer. Die berechneten Standardabweichungen der beiden Parameter werden geringfügig besser als mit den Standardparametern (Abb. 5.1c und 5.1d). Dennoch sind die Standardabweichungen um $\sim 58 \mu s$ in x- und um $\sim 1044 \mu s$ in y-Richtung schlechter als mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.2c und 5.2d).

Für die Polkoordinate in x-Richtung (Abb. 5.3a) verkleinert sich der Zuschlag im Vergleich zum Ausschluss von HOBART26 (Abb. 5.2a) um $\sim 4 \mu s$ auf $\sim 253 \mu s$. Die Standardabweichung verbessert sich von $\sim 48 \mu s$ auf $\sim 43 \mu s$. Im Vergleich mit den Standardparametern (Abb. 5.1a) wird der Zuschlag zwar kleiner, die Standardabweichung bleibt jedoch auf demselben Wert.

In y-Richtung wird der Zuschlag im Vergleich zum Ausschließen der Station HO-BART26 (Abb. 5.2b) wieder höher. Dieser vergrößert sich auf $\sim 78 \mu s$ (Abb. 5.3b). Die Standardabweichung des Zuschlages wird um $\sim 3 \mu s$ verbessert. Im Vergleich zur Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.1b) wird der Zuschlag größer, die Standardabweichung jedoch um $\sim 2 \mu s$ kleiner.

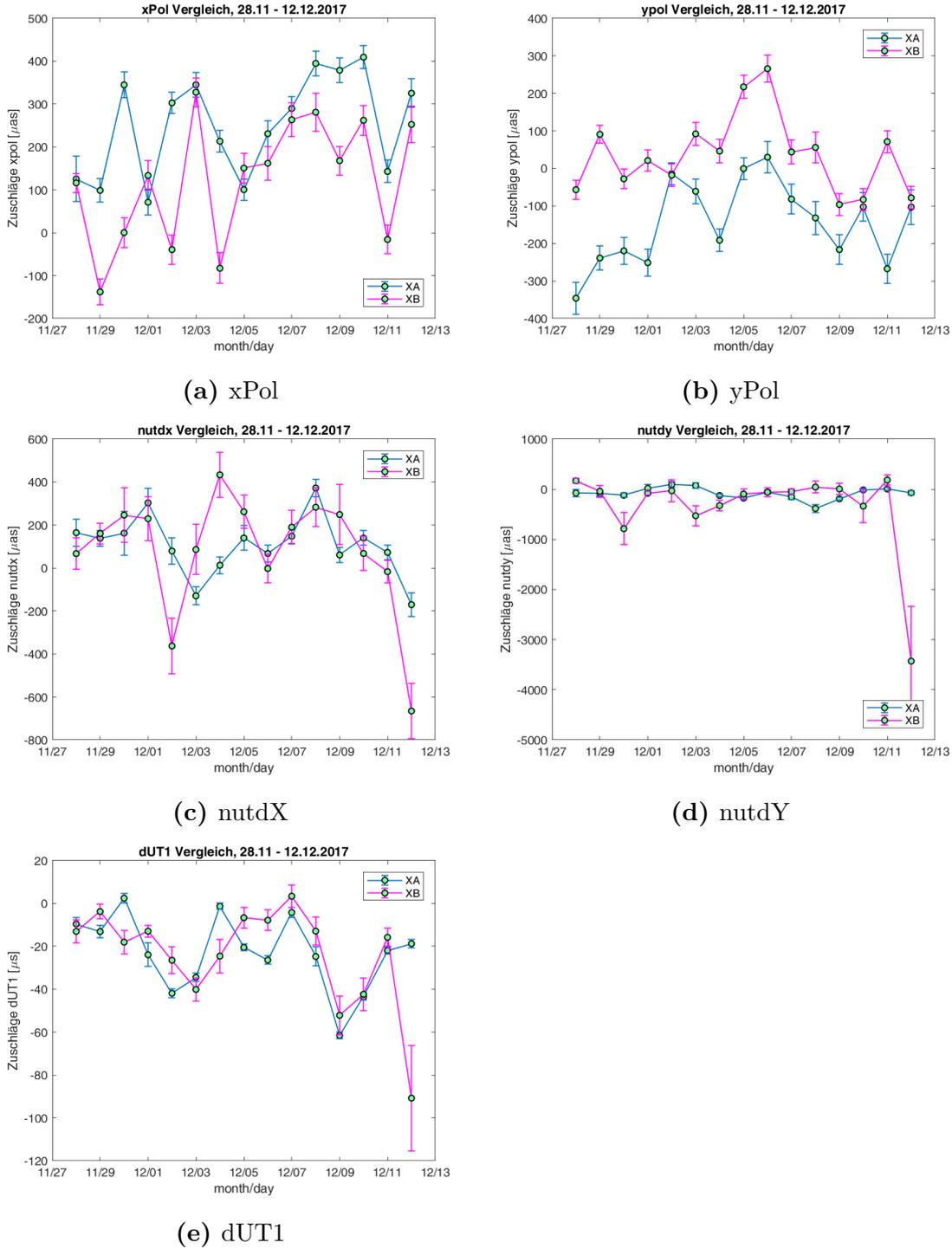


Abbildung 5.3: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station KASHIM11 des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)

5.1.1.2.3 ZELENCHK

In Abb. 5.4 sind die Ergebnisse mit dem Ausschließen der Station ZELENCHK ersichtlich. Sowohl der Zuschlag des dUT1 Parameters mit einem Wert von $\sim -61 \mu s$ als auch die Standardabweichung mit $\sim 25 \mu s$ werden im Vergleich zum Ausschluss

der Station HOBART26 (Abb. 5.2e) größer. Im Vergleich zu der Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.1e) wird zwar der Zuschlag kleiner, die Standardabweichung bleibt jedoch gleich.

Bei den Zuschlägen zu den Nutationsparametern zeigt sich im Vergleich zur Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.1c und 5.1d) ein ähnlicher Trend. Die Zuschläge in x- und y-Richtung werden mit $\sim 702 \mu\text{as}$ und $\sim 1823 \mu\text{as}$ (Abb. 5.4c und 5.4d) kleiner. Ebenso verringern sich die Standardabweichungen mit $\sim 129 \mu\text{as}$ und $\sim 1130 \mu\text{as}$. Im Vergleich zum Ausschluss der Station HOBART26 (Abb. 5.2c und 5.2d) sind diese Werte jedoch immer noch um einiges höher.

Die beiden terrestrischen Polkoordinaten verringern sich auf $\sim 229 \mu\text{as}$ und $\sim 3 \mu\text{as}$ (Abb. 5.4a und 5.4b). Die Zuschläge zu den Polkoordinaten sind damit niedriger als mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.2a und 5.2b) und der Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.1a und 5.1a). Ein Blick auf die Standardabweichungen der Zuschläge zeigt mit den Werten $\sim 42 \mu\text{as}$ und $\sim 31 \mu\text{as}$ eine Verbesserung zu der Lösung mit den Standardparametern und dem Ausschluss der Station HOBART26.

Zusammenfassend bringt das Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.2) im Vergleich zum Ausschließen der anderen beiden Stationen (Abb. 5.3 und 5.4), die größte Verbesserung zu der Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.1).

5.1.3 Troposphäre

In Abb. 5.5 sind die Ergebnisse mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten, statt wie in den Standardeinstellungen alle 60 Minuten (Abschnitt 5.1.1), dargestellt. Generell unterscheiden sich die Ergebnisse nur geringfügig zu der Lösung ohne die Station HOBART26 (Abschnitt 5.1.2.1). Für einen genaueren Vergleich der Ergebnisse im Vergleich zum Ausschluss der Station HOBART26, siehe Abschnitt 5.3.1.3.

5.1.4 Nutation fixiert

In Abb. 5.6 sind die Ergebnisse ohne dem Schätzen der Nutationsparameter gezeigt. Nicht Schätzen bedeutet, dass die Parameter auf ihre *a priori* Werte fixiert werden. Da die Nutationsparameter nicht an der Ausgleichung teilnehmen, sind diese in der Abb. 5.6 nicht visualisiert.

Die Zuschläge zu den *a priori* dUT1 Werten (Abb. 5.6c) unterscheiden sich nur geringfügig zu der Lösung des Ausschließens der Station HOBART26 (Abb. 5.2e). Der berechnete formale Fehler (Standardabweichung der Ausgleichung) der dUT1 Parameter verbessert sich allerdings bei beiden Netzwerken nur minimal.

Im Vergleich dazu ändern sich die Zuschläge zu den *a priori* terrestrischen Polkoordinaten (Abb. 5.6a und 5.6b) kaum.

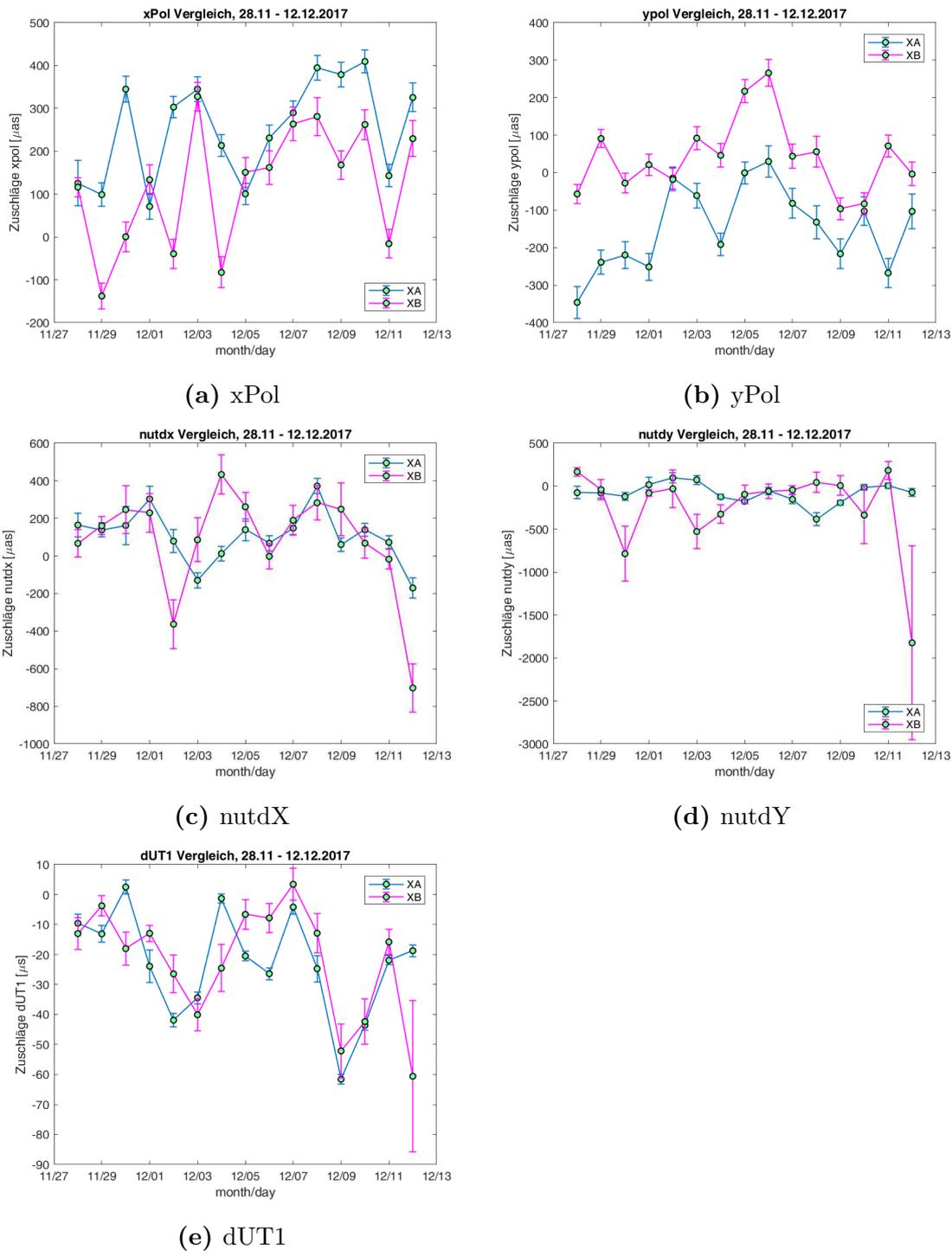


Abbildung 5.4: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station ZELENCHK des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)

5.2 Globale Lösung

In Abb. 5.7 sind die Zuschläge zu den *a priori* Erdorientierungsparametern, berechnet mit der globalen Lösung (Abschnitt 4.2), gezeigt. Eine kurze Anmerkung zu den Visualisierungen der globalen Lösung aus diesem Abschnitt und allen folgenden

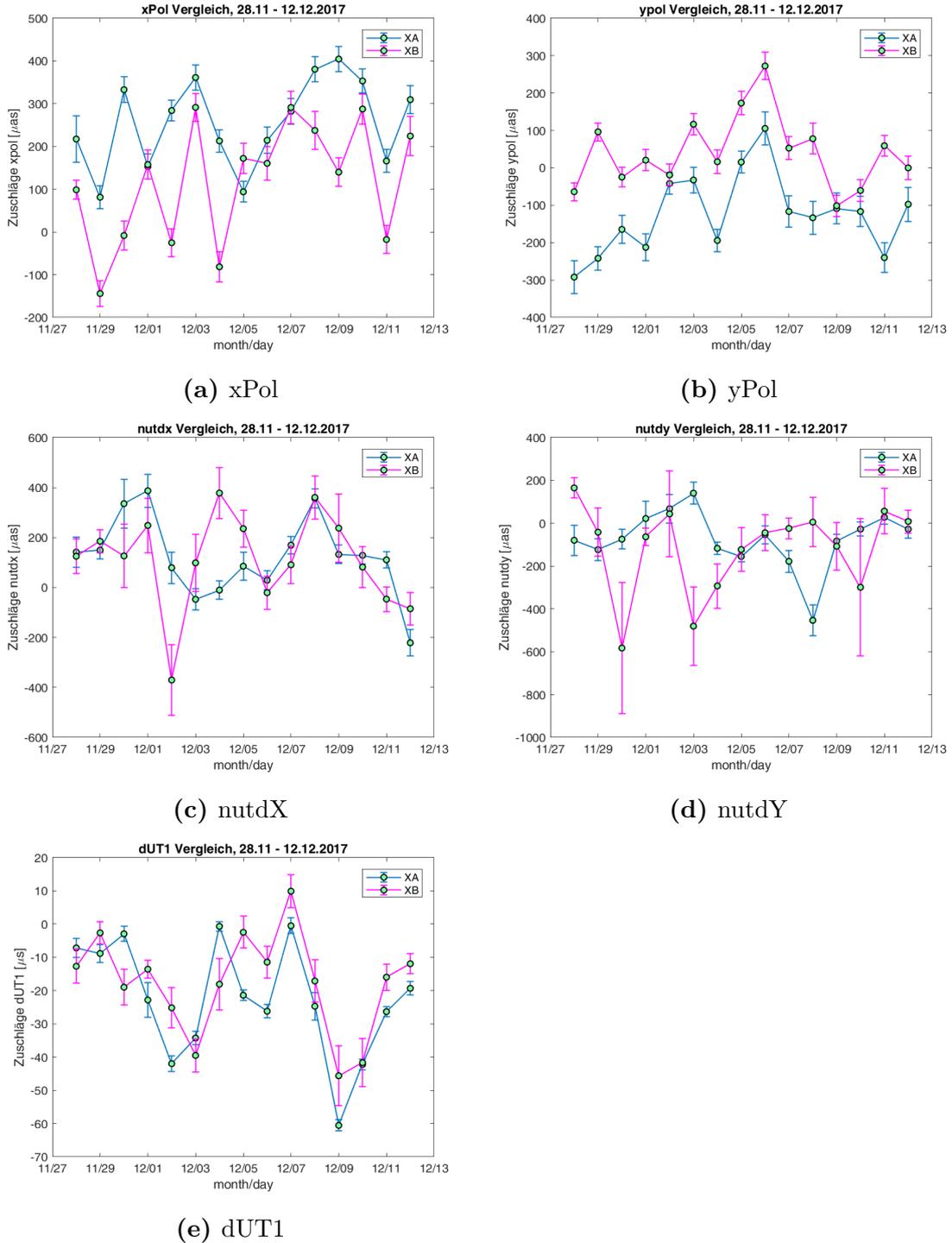


Abbildung 5.5: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Schätzintervall des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abschnitt 4.1.3)

(Abschnitte 5.3.2.1 und 5.3.2.2): Die berechneten Zuschläge zu den *a priori* EOP beziehen sich immer auf 0:00 (Mitternacht) des jeweiligen Tages¹. Im Vergleich dazu

¹z.B. Wenn von einem Wert für den 28.11. gesprochen wird, ist der 28.11. um 0:00 (Mitternacht) gemeint

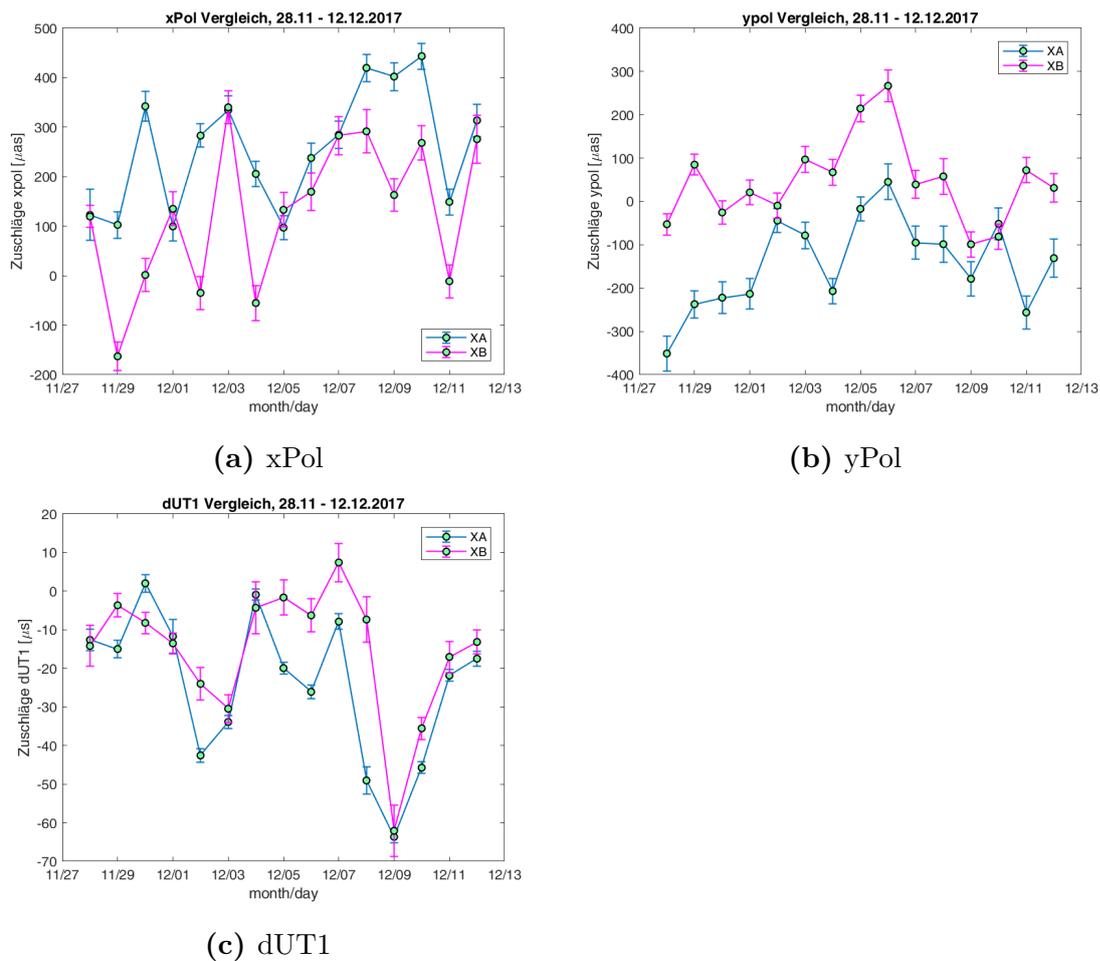


Abbildung 5.6: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 4.1.4)

wird bei der *single session* Lösung (Abschnitte 5.1 und 5.3.1) der Wert immer für 12:00 mittags ausgegeben².

Die Zuschläge zu den *a priori* dUT1 Werten (Abb. 5.7e) zeigen, dass die Lösung von beiden Netzwerken sehr ähnlich ist. Die Zuschläge von beiden Netzwerken unterscheiden sich lediglich um eine geringe Abweichung. Es ist ein Offset erkennbar, der über die gesamte Kampagne nahezu konstant bleibt.

Für die Polkoordinate in x-Richtung (Abb. 5.7a) unterscheiden sich die Zuschläge der beiden Netzwerke. Es ist immer noch ein quasi konstanter Offset zwischen den beiden Netzwerken sichtbar. Dieser fällt jedoch nicht mehr so deutlich aus, wie bei dem dUT1 Wert. In y-Richtung (Abb. 5.7b) liegen die berechneten Zuschläge weiter voneinander weg. Die Zuschläge unterscheiden sich teilweise um bis zu 270 μs und passen schlechter zueinander als die x-Zuschläge.

²z.B. Wenn von einem Wert für den 28.11. gesprochen wird, ist der 28.11. um 12:00 mittags gemeint.

Für die Zuschläge der Nutationsparameter in x-Richtung (Abb. 5.7c) sind die Lösungen von beiden Netzwerken sehr ähnlich. Lediglich am 28.11. und am 13.12., weichen die Ergebnisse stark voneinander ab. Der hohe Zuschlag zwischen dem 30.11. und 2.12. ist gut erkennbar. Da jedoch beide Netzwerke sehr ähnliche Zuschläge für diesen Zeitraum haben, kann hier von keinem Ausreißer gesprochen werden. Es zeigt sich eine geringfügig andere Tendenz für die Zuschläge in y-Richtung (Abb. 5.7d). Bis zum 1.12. sind die Zuschläge von beiden Netzwerken ähnlich und zeigen eine gewisse systematische Abweichung. Ab dem 3.12. liegen die Zuschläge, bis auf ein paar Ausnahmen und zwar den 6.12., 8.12. und 10.12., weiter voneinander weg. Hier lässt sich die Systematik nicht mehr gut erkennen.

5.3 Biases der Netzwerke

In diesem Abschnitt wird auf die berechneten Abweichungen der Zuschläge zu den *a priori* EOP zwischen den Netzwerken, sowie die Standardabweichung der Differenzen, sprich Biases eingegangen. In Abschnitt 5.3.1 werden die berechneten Biases der *single sessions* angegeben, in Abschnitt 5.3.2 die der globalen Lösung.

Anmerkungen zu den folgenden Darstellungen in den Abschnitten 5.3.1 und 5.3.2: Die orange horizontale Linie beschreibt den Mittelwert der Differenzen, also der Offset zwischen den beiden Netzwerken. Der Wert σ beschreibt die Standardabweichung der Differenzen, also die Streuung um den Mittelwert. Zusammen beschreiben die beiden Parameter die Biases zwischen den beiden Netzwerken (in den Legenden der Darstellungen XA/XB Bias). Wenn von einer Differenz eines einzelnen Tages geschrieben wird und dann die größte Differenz beschrieben wird, dann ist damit die betragsmäßig größte Differenz gemeint (die größte Abweichung sowohl positiv als auch negativ).

5.3.1 Single Sessions

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Erdorientierungsparametern, berechnet mit der *single session* Lösung der beiden Netzwerke, mittels der Biases verglichen.

5.3.1.1 Biases Standardparameter

Bei den Standardparametern ist am 12.12. für das XB-Netzwerk die Station HOBART26 noch inkludiert. Obwohl es sich in Abb. 5.8e um die Darstellung der Zuschläge zum dUT1 Wert mit den Standardparametern handelt, liegt der Offset zwischen den Netzwerken nur bei $0.75 \mu s$. Am 12.12. des XB-Netzwerkes weicht der Zuschlag mit $\sim -80 \mu s$ deutlich von den anderen Tagen ab. Der mit Abstand größte Versatz zwischen den beiden Netzwerken befindet sich am 12.12. mit $\sim 63 \mu s$. Auch die Standardabweichung der Differenzen ist verhältnismäßig hoch, diese liegt bei $\sim 21 \mu s$.

Die Mittelwerte der Differenzen der terrestrischen Polkoordinaten (Abb. 5.8a und 5.8b) liegen mit $\sim 128 \mu s$ und $\sim 186 \mu s$ sehr weit voneinander weg. Die berechneten Standardabweichungen sind mit $\sim 135 \mu s$ und $\sim 104 \mu s$ allerdings auch sehr hoch. Die größten Abweichungen bezüglich der Polbewegung in x-Richtung findet man am 30.11. mit $\sim 345 \mu s$, am 2.12. mit $\sim 342 \mu s$ und am 4.12. mit ~ 296

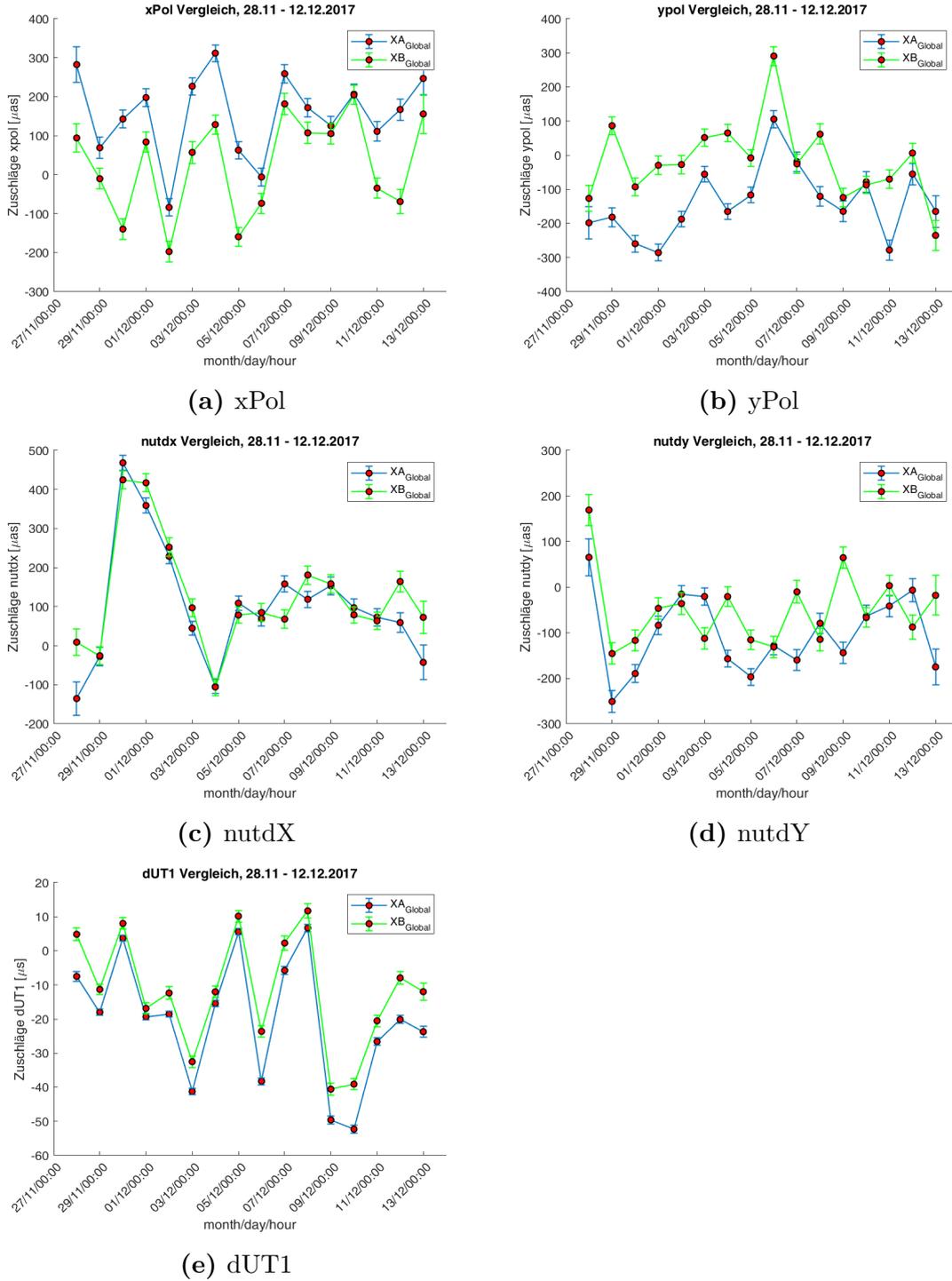


Abbildung 5.7: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Berechnung der globalen Lösung von beiden Netzwerken (Abschnitt 4.2)

μs . In y-Richtung sind die größten Differenzen am 28.11. mit $\sim -289 \mu\text{s}$, am 29.11. mit $\sim -330 \mu\text{s}$, am 1.12. mit $\sim -272 \mu\text{s}$ und am 11.12. mit $\sim -339 \mu\text{s}$ berechnet worden. Was auffällt ist, dass der Offset für beide Polkoordinaten generell sehr hoch ist. Für die x-Polkoordinate gibt es nur fünf Tage, an denen die Abweichungen geringer als $50 \mu\text{s}$ oder $-50 \mu\text{s}$ sind: 30.11., 3.12., 5.12., 7.12. und 12.12. An nur drei

Tagen sind die Differenzen der Polbewegung in y-Richtung zwischen dem XA- und XB-Netzwerk geringer als $50 \mu\text{s}$ oder $-50 \mu\text{s}$: am 2.12., am 10.12. und am 12.12.

Der extrem hohe Zuschlag vom 12.12. zum *a priori* Nutationsparameter in x-Richtung, beobachtet durch das XB-Netzwerk (Abb. 5.8c), wirkt sich nicht sehr stark auf den Mittelwert aus. Dieser fällt mit $\sim 26 \mu\text{s}$ vergleichsweise gering aus. Die berechnete Standardabweichung hingegen liegt mit $\sim 240 \mu\text{s}$ deutlich höher. Die größten Abweichungen von beiden Netzwerken befinden sich am 2.12. mit $\sim 442 \mu\text{s}$, am 4.12. mit $\sim 421 \mu\text{s}$ und am 12.12. mit $\sim 544 \mu\text{s}$.

In y-Richtung der Nutation (Abb. 5.8d) liegt der berechnete Bias höher als in x-Richtung. Der Offset beträgt $\sim 239 \mu\text{s}$ mit einer Standardabweichung von $\sim 781 \mu\text{s}$. Diese überaus hohe Standardabweichung lässt sich durch den Ausreißer des XB-Netzwerkes vom 12.12. erklären. Die größten Einzeldifferenzen, abgesehen vom 12.12. mit $\sim 2842 \mu\text{s}$, belaufen sich auf $\sim 666 \mu\text{s}$ am 30.11., $\sim 602 \mu\text{s}$ am 3.12., $\sim 428 \mu\text{s}$ am 8.12. und auf $\sim 323 \mu\text{s}$ am 10.12.

5.3.1.2 Biases ohne HOBART26

Ohne die Station HOBART26 des XB-Netzwerkes vom 12.12. ändert sich der Mittelwert des dUT1 Parameters (Abb. 5.9e) von $0.75 \mu\text{s}$ (Abb. 5.8e) auf $-3.7 \mu\text{s}$. Die Abweichung vom 12.12. ohne die Station HOBART26 verändert sich auf einen negativen Wert von $\sim -3 \mu\text{s}$. Eine Verbesserung, im Gegensatz zu den Standardparametern (Abb. 5.8e), stellt die Standardabweichung der dUT1 Abweichungen dar. Diese verbessert sich von $\sim 21 \mu\text{s}$ auf $\sim 12 \mu\text{s}$ (Abb. 5.9e).

Mit dem Ausschließen der Station HOBART26 ändert sich die Abweichung zwischen dem XA- und XB-Netzwerk am 12.12. von $\sim 63 \mu\text{s}$ (Abb. 5.8e) auf $\sim -4 \mu\text{s}$. Dies entspricht einer deutlichen Verkleinerung des Bias zwischen den beiden Netzwerken. Durch das Weglassen der Station HOBART26 am 12.12. des XB-Netzwerkes, wird gleichzeitig die mit den Standardparametern größte Tagesabweichung des dUT1 Wertes verringert.

Die Biases für die terrestrischen Polkoordinaten (Abb. 5.9a und 5.9b) zeigen quasi keine Änderung zu der Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.8a und 5.8a). In x-Richtung sind die Offsets fast ident und in y-Richtung unterscheiden sich diese nur um $\sim 4 \mu\text{s}$.

Wenn man nur die Differenz am 12.12. betrachtet, erkennt man eine Abweichung der x-Polkoordinate von $\sim 69 \mu\text{s}$. Dies entspricht einer Vergrößerung von $\sim 5 \mu\text{s}$ im Gegensatz zur Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.8a). Auch in y-Richtung vergrößert sich die Differenz am 12.12. Dieser wird nun zu $\sim -128 \mu\text{s}$ berechnet.

Die Standardabweichung der Differenzen für die x-Koordinate ist sowohl für die Berechnung mit den Standardparametern (Abb. 5.8a) als auch mit der Berechnung ohne die Station HOBART26 gleich. Für die y-Koordinate unterscheidet sich die Standardabweichung nur um $\sim 2 \mu\text{s}$.

Der Versatz der Nutation in x-Richtung ändert sich von $\sim 25 \mu\text{s}$ (Abb. 5.8c) auf $\sim -23 \mu\text{s}$ (Abb. 5.9c). Die berechnete Standardabweichung ändert sich hier noch stärker von $\sim 240 \mu\text{s}$ auf $\sim 197 \mu\text{s}$. Die Tagesabweichung vom 12.12. ändert sich durch das Ausschließen der Station HOBART26 von $\sim 544 \mu\text{s}$ auf $\sim -180 \mu\text{s}$. Dies entspricht einer Veränderung von $\sim 724 \mu\text{s}$.

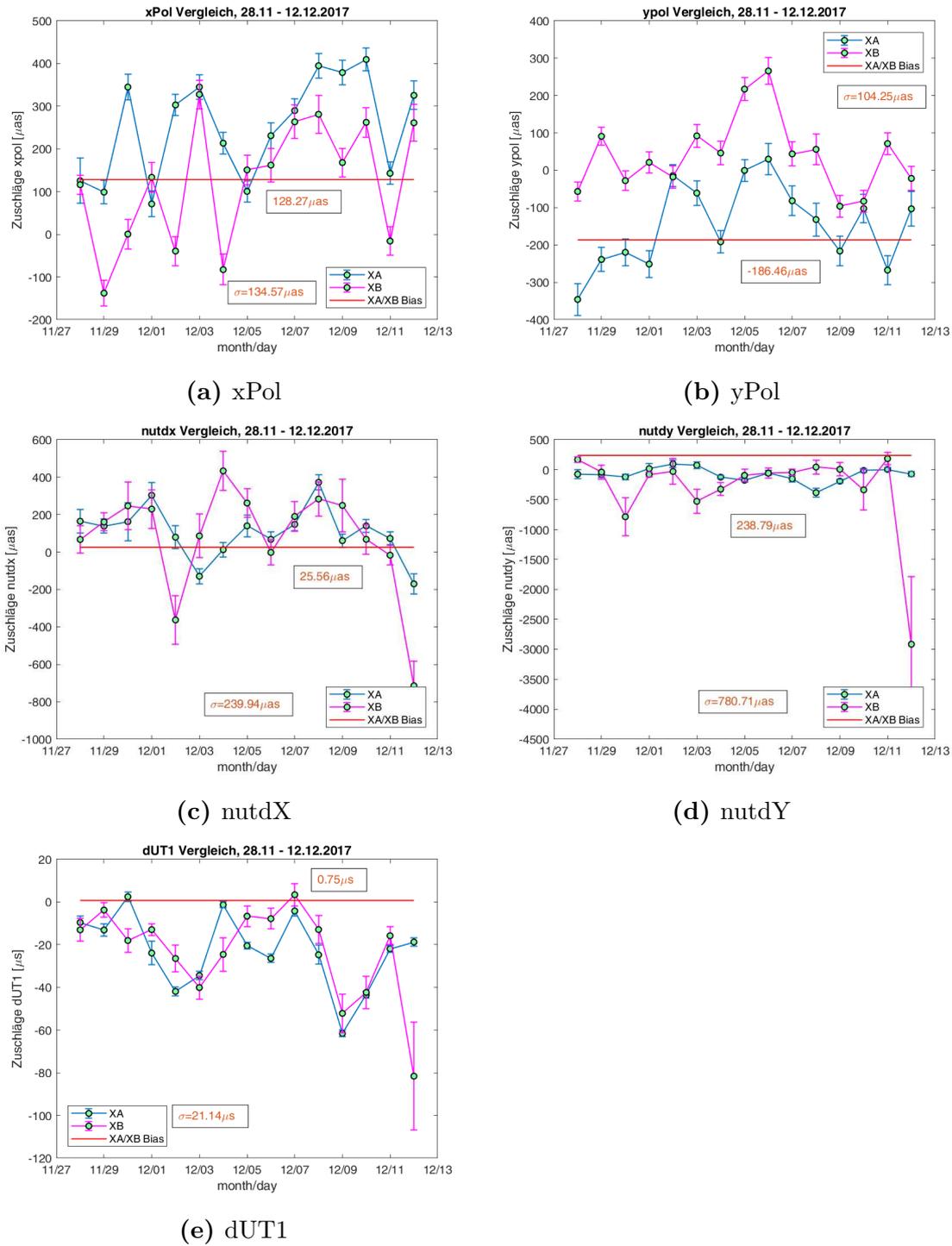


Abbildung 5.8: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit den Standardparametern (Abschnitt 4.1.1) und einer Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).

Eine noch größere Verbesserung ist in dem Bias der y-Koordinate der Nutation (Abb. 5.9d) zu sehen. Im Vergleich zu den Standardparametern (Abb. 5.8d) mit $\sim 239 \mu s$ ist der Abfall des Offsets auf $\sim 56 \mu s$ doch sehr beachtlich. Die Verbesserung ohne die Station HOBART26 vom 12.12. des XB-Netzwerkes ist noch klarer in der Standardabweichung ersichtlich. Hier erreicht man durch den Abfall von $\sim 781 \mu s$

auf $\sim 301 \mu\text{s}$ eine Reduktion der Streuung von ca. 61 %. Diese doch sehr erhebliche Senkung der Standardabweichung ist durch die starke Veränderung des Zuschlages zu der *a priori* y -Nutation des XB-Netzwerkes vom 12.12. bedingt. Wie schon in Abschnitt 5.1.2.1 beschrieben, fällt hier der Zuschlag von $\sim 1132 \mu\text{s}$ auf $\sim 54 \mu\text{s}$. Die Differenz ändert sich damit für den 12.12. von $\sim 2842 \mu\text{s}$ (Abb. 5.8d) auf $\sim 98 \mu\text{s}$ (Abb. 5.9d).

5.3.1.3 Biases Troposphäre

Durch das Schätzen des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten ändern sich auch die berechneten Zuschläge zu den *a priori* Erdorientierungsparametern. Der Offset des dUT1 Parameters ändert sich auf $\sim -5 \mu\text{s}$ (Abb. 5.10e) und ist damit sogar eine Spur höher, als mit den Standardeinstellungen (Abb. 5.8e) ($\sim 0.75 \mu\text{s}$) und dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.9e) ($\sim -3.7 \mu\text{s}$). Bei beiden wird der feuchte Anteil der Troposphäre alle 60 Minuten geschätzt. Durch die kleiner werdende Standardabweichung von $\sim 11 \mu\text{s}$ ist jedoch eine Verbesserung von $\sim 10 \mu\text{s}$, im Gegensatz zu den Standardeinstellungen (Abschnitt 5.3.1.1), erkennbar. Der Unterschied von $\sim 1 \mu\text{s}$ zur Lösung ohne die Station HOBART26 am 12.12., in Abschnitt 5.3.1.2 beschrieben, ist jedoch sehr gering.

Der größte berechnete Differenzwert aller Tage mit den Standardeinstellungen ergibt $\sim 63 \mu\text{s}$ (Abb. 5.8e) für den 12.12.2017. Mittels des Schätzens des feuchten Anteils der Troposphäre in einem kürzeren Intervall kann dieser auf $\sim 7 \mu\text{s}$ reduziert werden. Im Vergleich zur Lösung mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.9e)³ wird die Abweichung jedoch größer.

Im Vergleich zu der Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.8a) wird der Offset für den Zuschlag der terrestrischen Polkoordinaten in x -Richtung (Abb. 5.10a) sogar um ca. $10 \mu\text{s}$ auf $\sim 138 \mu\text{s}$ erhöht. Auch durch die Lösung ohne die Station HOBART26 (Abb. 5.9a) wird ein geringerer Offset mit einen Unterschied von $\sim 11 \mu\text{s}$ berechnet. Die Standardabweichung wird jedoch um $\sim 7 \mu\text{s}$, im Vergleich zu den Standardeinstellungen (Abb. 5.8a) und $\sim 6 \mu\text{s}$ im Vergleich zum Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.9a), auf $\sim 128 \mu\text{s}$ gesenkt. Dies entspricht einer Verbesserung durch das Schätzen des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten, anstatt alle 60 Minuten zu Schätzen. Die größten berechneten Differenzen der einzelnen Tage, berechnet mit der Standardlösung (Abb. 5.8a), werden durch die hier genannte Lösung verkleinert. Für den 30.11. ergibt der Unterschied $\sim 341 \mu\text{s}$, für den 2.12. $\sim 309 \mu\text{s}$ und für den 4.12. $\sim 295 \mu\text{s}$, wobei die Verringerung für den letzten genannten Tag mit $\sim 1 \mu\text{s}$ sehr gering ist.

Im Vergleich zur Standardlösung (Abb. 5.8b) wird der Offset (Abb. 5.10b) für die y -Koordinate der terrestrischen Polbewegung um $\sim 20 \mu\text{s}$ auf $\sim 166 \mu\text{s}$ verringert. Der Unterschied zur Lösung ohne die Station HOBART26 (Abb. 5.9b) ist mit $\sim 24 \mu\text{s}$ sogar noch eine Spur größer. Auch die Standardabweichung verringert sich auf $\sim 94 \mu\text{s}$, was für eine Verbesserung zu beiden vorherigen Varianten (Abb. 5.8b und 5.9b) spricht. Bis auf einen Tag, verringern sich alle Tage mit den größten Abweichungen der Lösung mit den Standardwerten (Abb. 5.8b) durch das kleinere Schätzintervall des feuchten Anteils der Troposphäre (Abb. 5.10b). Am 28.11. wird dieser auf $\sim 228 \mu\text{s}$, am 1.12. auf $\sim 233 \mu\text{s}$ und am 11.12. auf $\sim 299 \mu\text{s}$ verkleinert.

³Zuschlag = $\sim -3.8 \mu\text{s}$

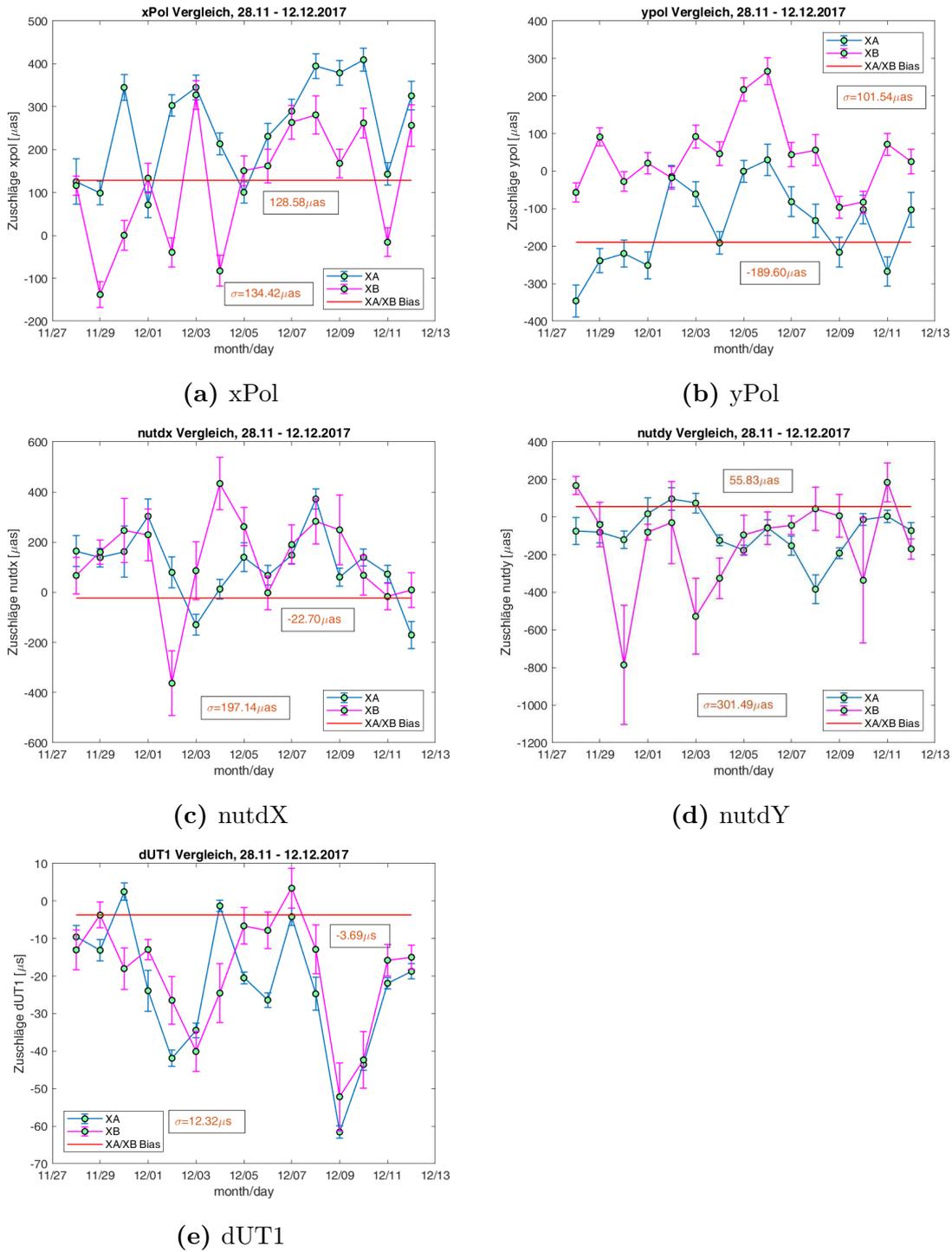


Abbildung 5.9: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter und für den 12.12. ohne die Station HOBART26 des XB-Netzwerkes. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).

Im Vergleich zur Standardlösung vergrößert sich der Unterschied nur am 29.11. um $\sim 8 \mu\text{as}$ auf $\sim 338 \mu\text{as}$.

Auch die Biases der Nutationsparameter werden kleiner sowohl im Bezug auf die

Standardparameter (Abb. 5.8c und 5.8d) als auch auf die Lösung ohne die Station HOBART26 (Abb. 5.9c und 5.9d).

Der Mittelwert der Differenzen des x-Nutationsparameters (Abb. 5.10c) verringert sich auf $12 \mu\text{s}$. Dies entspricht einer Verkleinerung von $\sim 14 \mu\text{s}$ im Vergleich zur Standardlösung (Abb. 5.8c) und einem Unterschied von $\sim 35 \mu\text{s}^4$ zu der Lösung ohne die Station HOBART26 (Abb. 5.9c). Von den drei größten Tagesdifferenzen mit den Standardparametern (Abb. 5.8c) werden zwei durch die Veränderung des Schätzintervalles der Troposphäre (Abb. 5.10c) verkleinert. Für den 4.12. verringert sich der Unterschied auf $\sim -389 \mu\text{s}$, für den 12.12. von $\sim 544 \mu\text{s}$ auf $\sim -136 \mu\text{s}$. Die dritte Abweichung erhöht sich um $\sim 7 \mu\text{s}$ auf $\sim 449 \mu\text{s}$. Da sich auch die Standardabweichung der Differenzen auf $\sim 194 \mu\text{s}$ verringert, welches einer Verkleinerung von $\sim 46 \mu\text{s}$ zur Standardlösung und $\sim 3 \mu\text{s}$ zur Lösung ohne der Station HOBART26 entspricht, kann auch anhand des x-Nutationsparameters von einer Verbesserung ausgegangen werden.

Der Offset des y-Nutationsparameters (Abb. 5.10d) beträgt $\sim 44 \mu\text{s}$. Im Gegensatz zur Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.8d) von $\sim 239 \mu\text{s}$ stellt dies eine beträchtliche Senkung des Offsets dar. Im Vergleich zur Lösung ohne die Station HOBART26 (Abb. 5.9d), aber trotzdem mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 60 Minuten, verringert sich der Offset um $\sim 12 \mu\text{s}$. Drei der fünf größten Abweichungen der Nutation in y-Richtung, berechnet mit der Standardlösung (Abb. 5.8d), verringern sich durch den im Abschnitt 5.3.1.3 beschriebenen Ansatz (Abb. 5.10d). Am 30.11. verringert sich der Abstand auf $\sim 508 \mu\text{s}$, am 10.12. auf $\sim 272 \mu\text{s}$. Die deutlichste Verkleinerung ist für den 12.12. zu erkennen. Hier verkleinert sich die Differenz auf $\sim -36 \mu\text{s}$. Zum Vergleich mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abb. 5.9d) beträgt die Veränderung am 12.12. $\sim -134 \mu\text{s}$. Im Vergleich zur Lösung mit den Standardparametern (Abb. 5.8d) vergrößert sich die Differenz am 3.12. um $\sim 19 \mu\text{s}$ auf $\sim 621 \mu\text{s}$ und am 8.12. um $\sim 31 \mu\text{s}$ auf $\sim 459 \mu\text{s}$. Am besten lässt sich eine Verbesserung mit dem kleineren Schätzintervall des feuchten Anteils der Troposphäre anhand der Standardabweichung die Differenz beobachten. Diese fällt auf $\sim 271 \mu\text{s}$ herab, welches einem prozentualen Abfall von $\sim 65\%$ entspricht. Im Gegensatz zur Lösung ohne die Station HOBART26 wird die Standardabweichung immer noch noch um $\sim 30 \mu\text{s}$ kleiner.

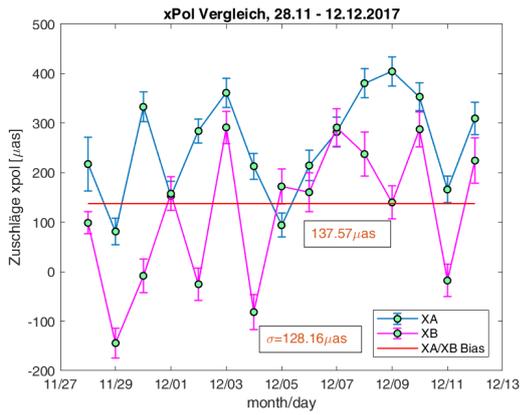
5.3.1.4 Biases ohne Nutation

In Abb. 5.11 sind die Zuschläge zu den *a priori* EOP mit dem Festlegen der Nutationsparameter auf ihre *a priori* Werte ersichtlich.

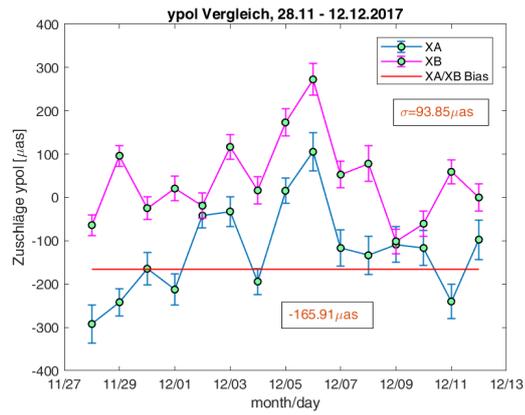
Sowohl die dUT1 Differenzen von beiden Netzwerke (Abb. 5.11c) als auch die Standardabweichung erhöhen sich im Vergleich zur Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abb. 5.10e). Der Mittelwert der Differenzen erhöht sich auf $\sim 9 \mu\text{s}$ und die Standardabweichung auf $\sim 13 \mu\text{s}$.

Der Versatz der x-Pol Koordinate verringert sich um $\sim 10 \mu\text{s}$ im Vergleich zu Abb. 5.10a auf $\sim 128 \mu\text{s}$ (Abb. 5.11a), die Standardabweichung wird jedoch um $\sim 5 \mu\text{s}$ auf $\sim 133 \mu\text{s}$ erhöht. In y-Richtung unterscheiden sich diese um $\sim 22 \mu\text{s}$. Der Offset vergrößert sich hier auf $\sim 188 \mu\text{s}$ und die Standardabweichung auf $\sim 104 \mu\text{s}$.

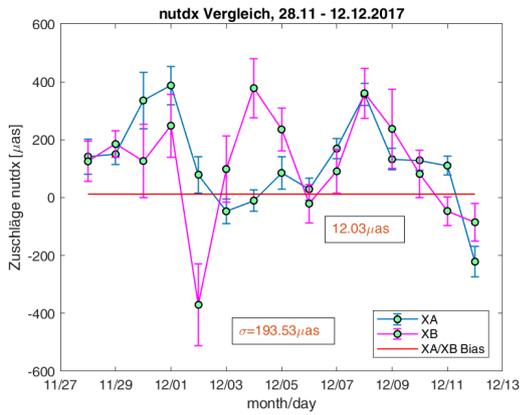
⁴der Offset der Lösung ohne die Station HOBART26 entspricht $\sim -23 \mu\text{s}$, der Offset der Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten $\sim 12 \mu\text{s}$



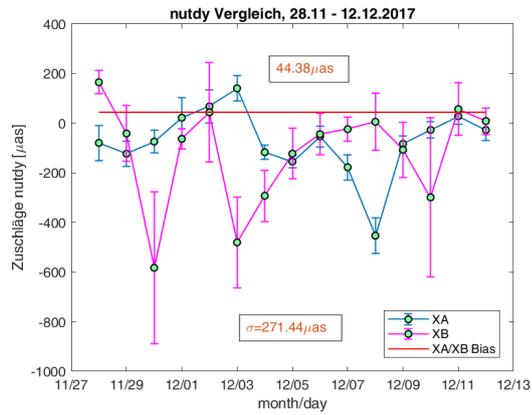
(a) xPol



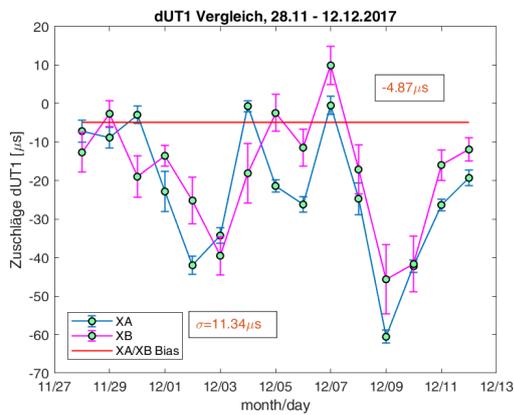
(b) yPol



(c) nutdX



(d) nutdY



(e) dUT1

Abbildung 5.10: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten und für den 12.12. ohne die Station HOBART26 des XB-Netzwerkes. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).

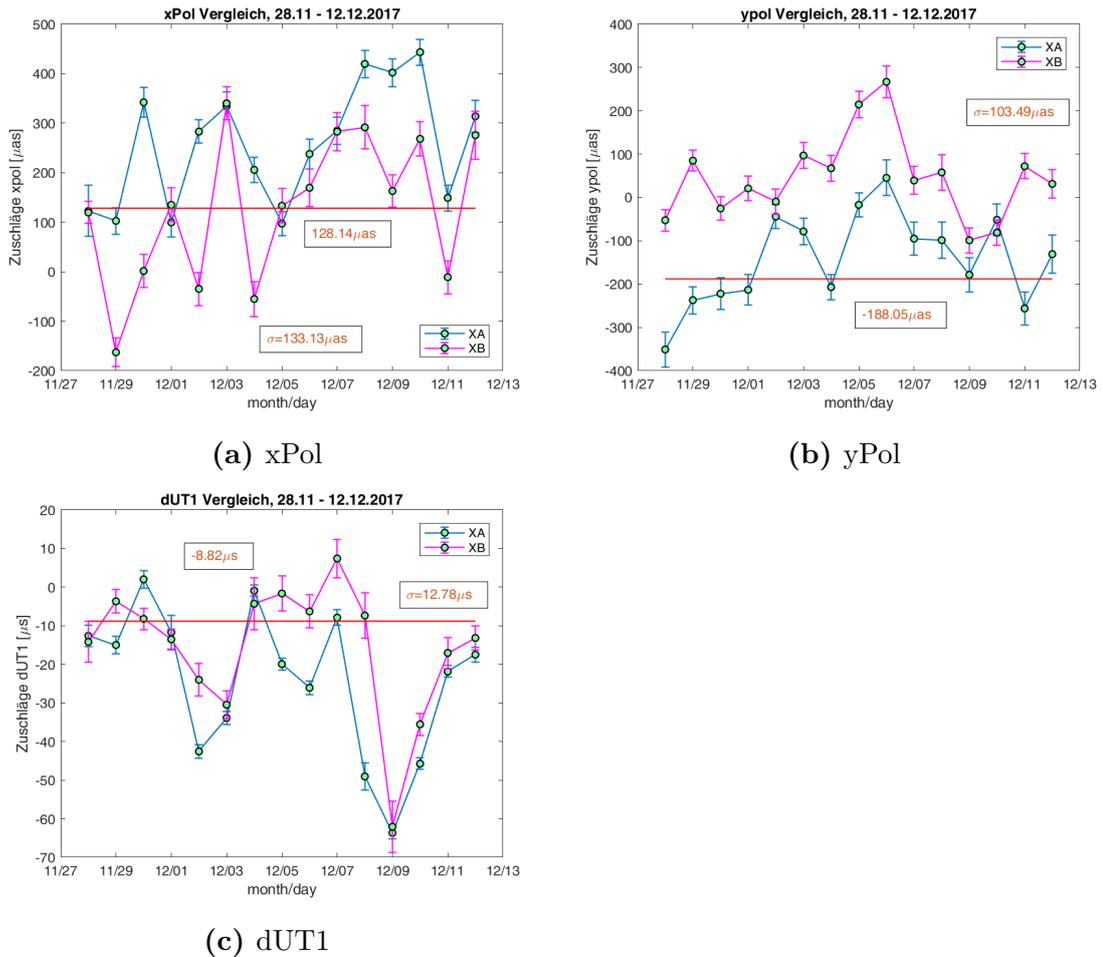


Abbildung 5.11: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter der *single session* Lösung, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich werden die Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk angezeigt

5.3.1.5 Vergleich der Biases der Single Sessions

Zur besseren Übersicht ist in Tabelle 5.1 und Abb. 5.12 eine Auflistung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen den beiden Netzwerken für alle fünf Erdorientierungsparameter mit den verschiedenen Auswertestrategien aus den Abschnitten 5.3.1.1 bis 5.3.1.4 gegeben. Außerdem wird in Tabelle 5.1 noch der formale Fehler der Berechnung der EOP angezeigt. Der hier angezeigte formale Fehler beschreibt den Mittelwert der formalen Fehler von allen Tagen. Die Spalte Standard aus Tabelle 5.1 beinhaltet die Werte der Auswertestrategie aus Abschnitt 5.3.1.1, HOBART26 die aus Abschnitt 5.3.1.2, Tropo. die aus Abschnitt 5.3.1.3 und Nutation die aus Abschnitt 5.3.1.4.

Generell kann man erkennen, dass der formale Fehler (Tabelle 5.1) des XA-Netzwerkes mit den Standardparametern (Abschnitt 5.3.1.1), bis auf die y-Polkoordinate, immer kleiner als der des XB-Netzwerkes ist. Man kann erkennen, dass für das XB-Netzwerk die formalen Fehler (Tabelle 5.1) mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abschnitt 5.3.1.2) sowohl für den dUT1 Parameter als auch für die beiden Nutationsparameter erheblich kleiner werden. Für die beiden

terrestrischen Polkoordinaten gibt es quasi keine Veränderung zu der Lösung mit den Standardparametern. Die Standardabweichung des dUT1 Parameters fällt von $\sim 7 \mu s$ auf $5.5 \mu s$. Noch besser ist dieses Verhalten in den beiden Nutationsparametern ersichtlich. Hier fällt der formale Fehler in x-Richtung von $\sim 95 \mu s$ auf $\sim 90 \mu s$ und in y-Richtung von $\sim 206 \mu s$ auf $\sim 134 \mu s$.

Der formale Fehler von beiden Netzwerken mit dem Schätzen des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abschnitt 5.3.1.3) zeigt kaum eine Veränderung zu der Lösung mit dem Ausschließen der Station HOBART26 (Abschnitt 5.3.1.2).

Das Fixieren der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 5.3.1.4) zeigt keine Verbesserung im Gegensatz zur Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abschnitt 5.3.1.3). Lediglich der formale Fehler (Tabelle 5.1) von beiden Netzwerken verbessert sich minimal.

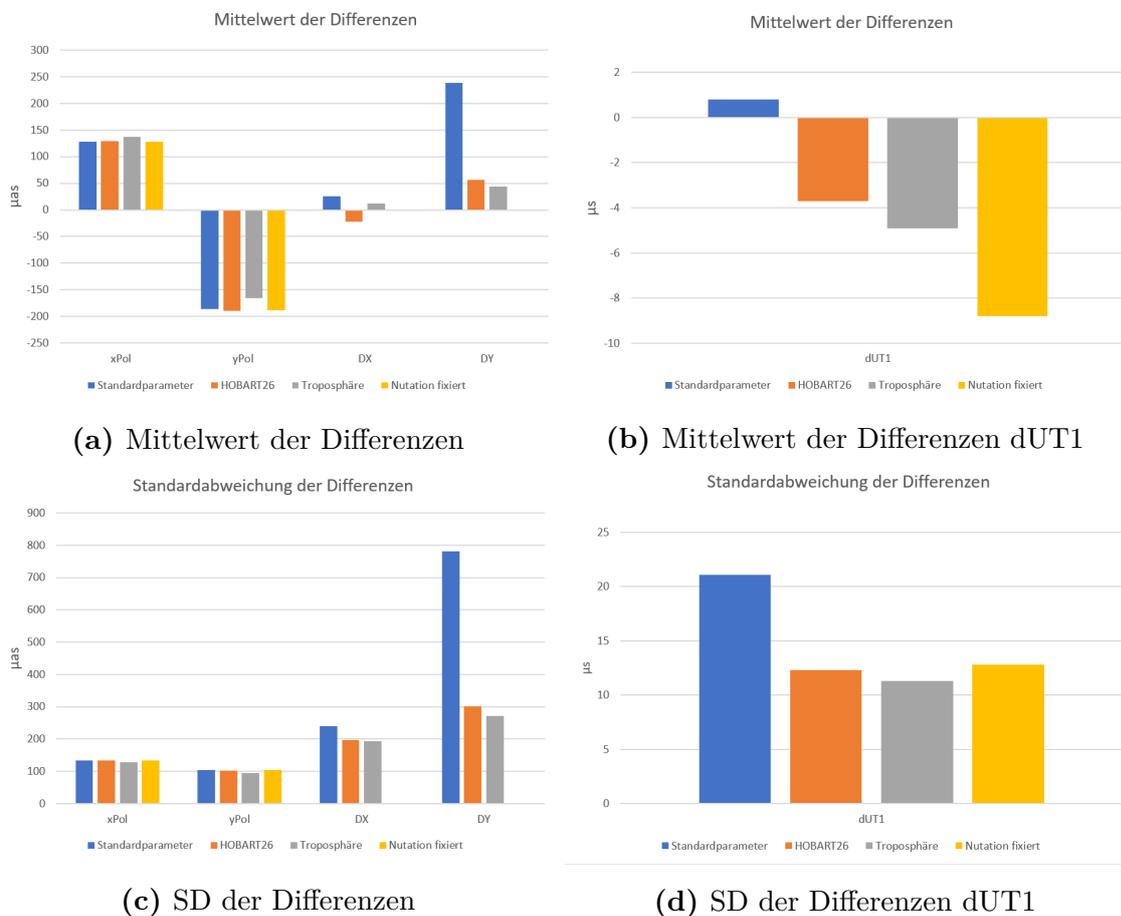


Abbildung 5.12: Diagramme der Biases (Mittelwert und SD) der EOP mit den verschiedenen Auswertestrategien der *single session* Lösung

5.3.2 Globale Lösung

Im Folgenden wird auf die Biases der Erdorientierungsparametern, berechnet mit der globalen Lösung der beiden Netzwerke, näher eingegangen.

Tabelle 5.1: Formaler Fehler der Berechnung des XA- und XB-Netzwerkes der *single session* Lösung mit den verschiedenen Auswertestrategien aus Abschnitt 5.3.1. Außerdem eine Übersicht des Offsets zwischen den berechneten Erdorientierungsparametern des XA- und XB-Netzwerkes und die Standardabweichung (SD) der EOP Differenzen. Alle Werte sind in μas bzw. für dUT1 in μs angegeben.

dUT1				
	Standard	HOBART26	Tropo.	Nutation
Formaler Fehler XA	2.4	2.4	2.4	2.1
Formaler Fehler XB	6.9	5.5	5.3	4.3
Offset XA/XB	0.8	-3.7	-4.9	-8.8
SD XA/XB	21.1	12.3	11.3	12.8
xPol				
	Standard	HOBART26	Tropo.	Nutation
Formaler Fehler XA	29.8	29.8	30.1	29.2
Formaler Fehler XB	35.2	35.5	35.2	35.0
Offset XA/XB	128.3	128.6	137.6	128.1
SD XA/XB	134.6	134.4	128.2	133.1
yPol				
	Standard	HOBART26	Tropo.	Nutation
Formaler Fehler XA	37.2	37.2	37.8	35.8
Formaler Fehler XB	30.3	30.4	29.9	30.3
Offset XA/XB	-186.5	-189.6	-165.9	-188.1
SD XA/XB	104.3	101.5	93.9	103.5
dX				
	Standard	HOBART26	Tropo.	Nutation
Formaler Fehler XA	49.6	49.6	48.7	-
Formaler Fehler XB	94.5	90.3	89.7	-
Offset XA/XB	25.6	-22.7	12.0	-
SD XA/XB	239.9	197.1	193.5	-
dY				
	Standard	HOBART26	Tropo.	Nutation
Formaler Fehler XA	48.7	48.7	48.2	-
Formaler Fehler XB	206.2	134.4	129.1	-
Offset XA/XB	238.8	55.8	44.4	-
SD XA/XB	780.7	301.5	271.4	-

5.3.2.1 Biases der globalen Lösung

In Abb. 5.13 werden die Biases der Erdorientierungsparameter der globalen Lösung von den beiden Netzwerken gezeigt. Zur besseren Übersicht ist in Abb. 5.14 noch ein direkter Vergleich der Biases der Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten⁵ und der globalen Lösung gezeigt. Ein Vergleich der tageweisen Abweichungen der *single session* Lösung mit der globalen Lösung ist nur bedingt sinnvoll. Für die globale Lösung werden die EOP immer jeden Tag zu Mitternacht und für die *single session* Lösung jeden Tag mittags ausgegeben. Ein genereller Vergleich des Mittelwertes der Differenzen kann im Gegensatz zum tageweisen Vergleich von beiden Lösungen angestellt werden.

Der Offset der Zuschläge zu den *a priori* dUT1 Wert (Abb. 5.13e und 5.14e) von den beiden Netzwerken beträgt für die globale Lösung $\sim -8 \mu\text{s}$. Dies ist im Vergleich zur *single session* Lösung aus Abschnitt 5.3.1.3 zwar um $\sim -3 \mu\text{s}$ höher, jedoch verringert sich die berechnete Standardabweichung. Im Gegensatz zu den $\sim 11 \mu\text{s}$ der *single session* Lösung sinkt die der globalen Lösung auf $\sim 4 \mu\text{s}$.

Für die Differenzen der terrestrische Polkoordinate in x-Richtung ergibt der Mittelwert (Abb. 5.13a) $\sim 129 \mu\text{s}$. Damit ist der Versatz der globalen Lösung um $\sim 11 \mu\text{s}$ niedriger als jener der *single session* Lösung (Abb. 5.14a). Die berechnete Standardabweichung verringert sich sogar um $\sim 48 \mu\text{s}$, was für eine bessere erreichte Genauigkeit der globalen Lösung im Gegensatz zur *single session* Lösung spricht.

In y-Richtung der Polkoordinate ergibt der Offset $\sim -123 \mu\text{s}$ (Abb. 5.13b), was wiederum einer Verringerung von $\sim 43 \mu\text{s}$ zur *single session* Lösung (Abb. 5.14b) entspricht. Die Standardabweichung der Differenzen der *single session* Lösung ist jedoch um $\sim 7 \mu\text{s}$ niedriger als die der globalen Lösung mit $\sim 101 \mu\text{s}$.

Der berechnete Offset der Zuschläge zu den *a priori* Nutationsparametern in x-Richtung ergibt $\sim -24 \mu\text{s}$ (Abb. 5.13c). Mit $\sim 12 \mu\text{s}$ wurde im Vergleich zur *single session* Lösung ein niedrigerer Offset berechnet. Wenn man jedoch die berechneten Standardabweichungen miteinander vergleicht (Abb. 5.14c) erkennt man, dass diese mit $\sim 62 \mu\text{s}$ um $\sim 132 \mu\text{s}$ geringer ist als die der *single session* Lösung.

Im Vergleich zur *single session* Lösung ist der Offset des Nutationsparameters in y-Richtung (Abb. 5.13d) mit $\sim -54 \mu\text{s}$ erneut um eine Spur größer. Die Standardabweichung der globalen Lösung ergibt mit $\sim 88 \mu\text{s}$ (Abb. 5.13d) ein um $\sim 183 \mu\text{s}$ besseres Ergebnis als mit der *single session* Lösung (Abb. 5.10d).

5.3.2.2 Biases der globalen Lösung mit Nutation fixiert

Für die globale Lösung ohne Schätzung der Nutationsparameter ergeben sich geringfügig andere Biases als mit Schätzung der Parameter heraus.

Der Offset der dUT1 Werte beträgt $\sim -9 \mu\text{s}$ (Abb. 5.15c) und ist damit nur um $\sim 1 \mu\text{s}$ weiter von 0 entfernt als mit dem Schätzen der Nutation. Auch bezüglich der Standardabweichung der Differenzen unterscheiden sich die beiden Lösungen (Abb. 5.13 und 5.15c) nur um $\sim 0.1 \mu\text{s}$ und haben damit quasi den gleichen Wert. Es kann ein Vergleich der Abweichungen der einzelnen Tage mit denen der globalen Lösung mit Schätzung der Nutationsparameter angestellt werden. Die Tage mit

⁵im Weiteren *single session* Lösung genannt

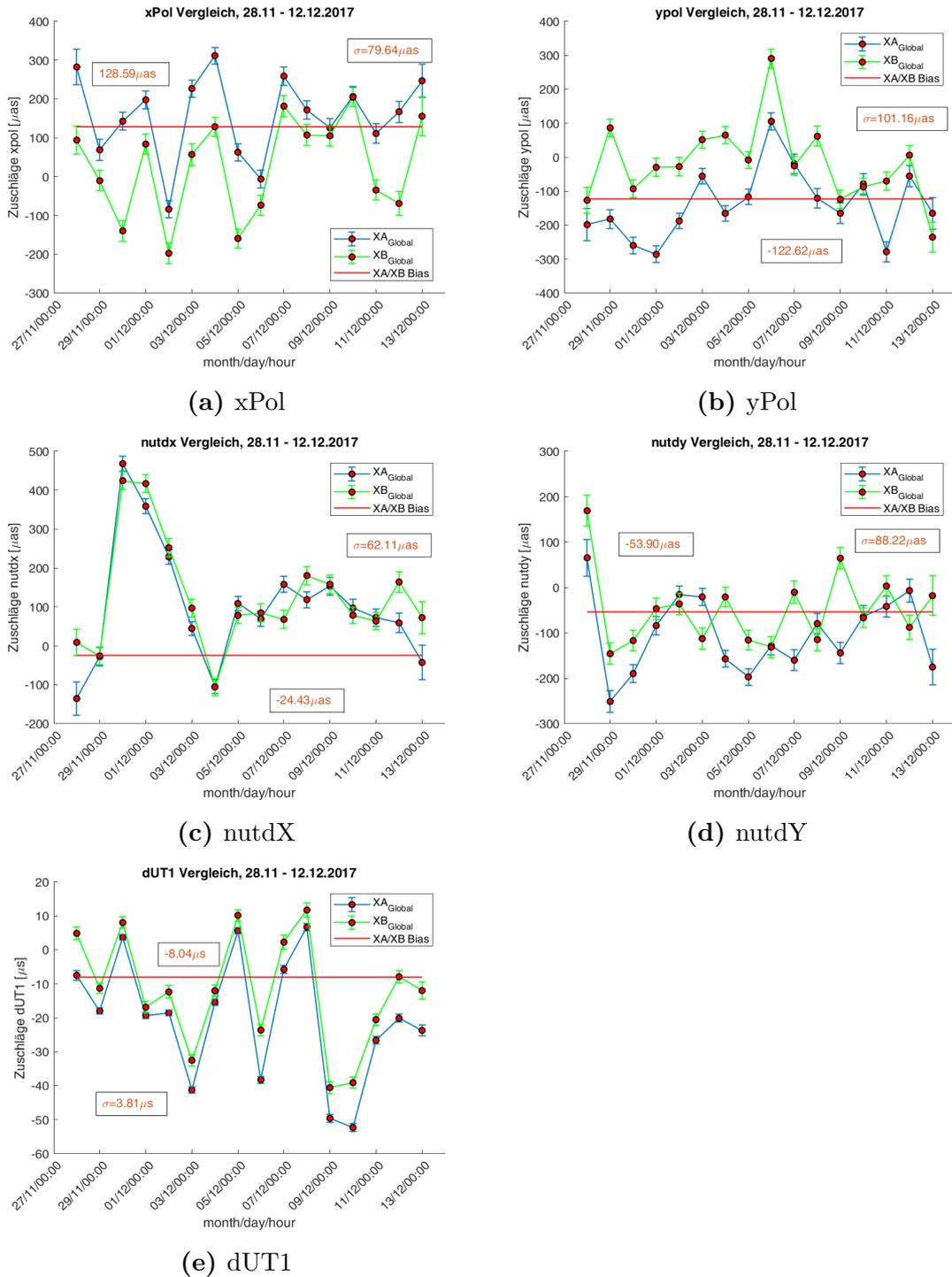


Abbildung 5.13: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Berechnung der globalen Lösung. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3).

den größten Differenzen aus Abschnitt 5.3.2.1 bleiben entweder gleich, oder werden gering um bis zu $\sim -2 \mu\text{s}$ schlechter als mit den Nutationsparametern.

Für den Offset der x-Polkoordinate ist der Unterschied schon etwas deutlicher

5.3. BIASES DER NETZWERKE

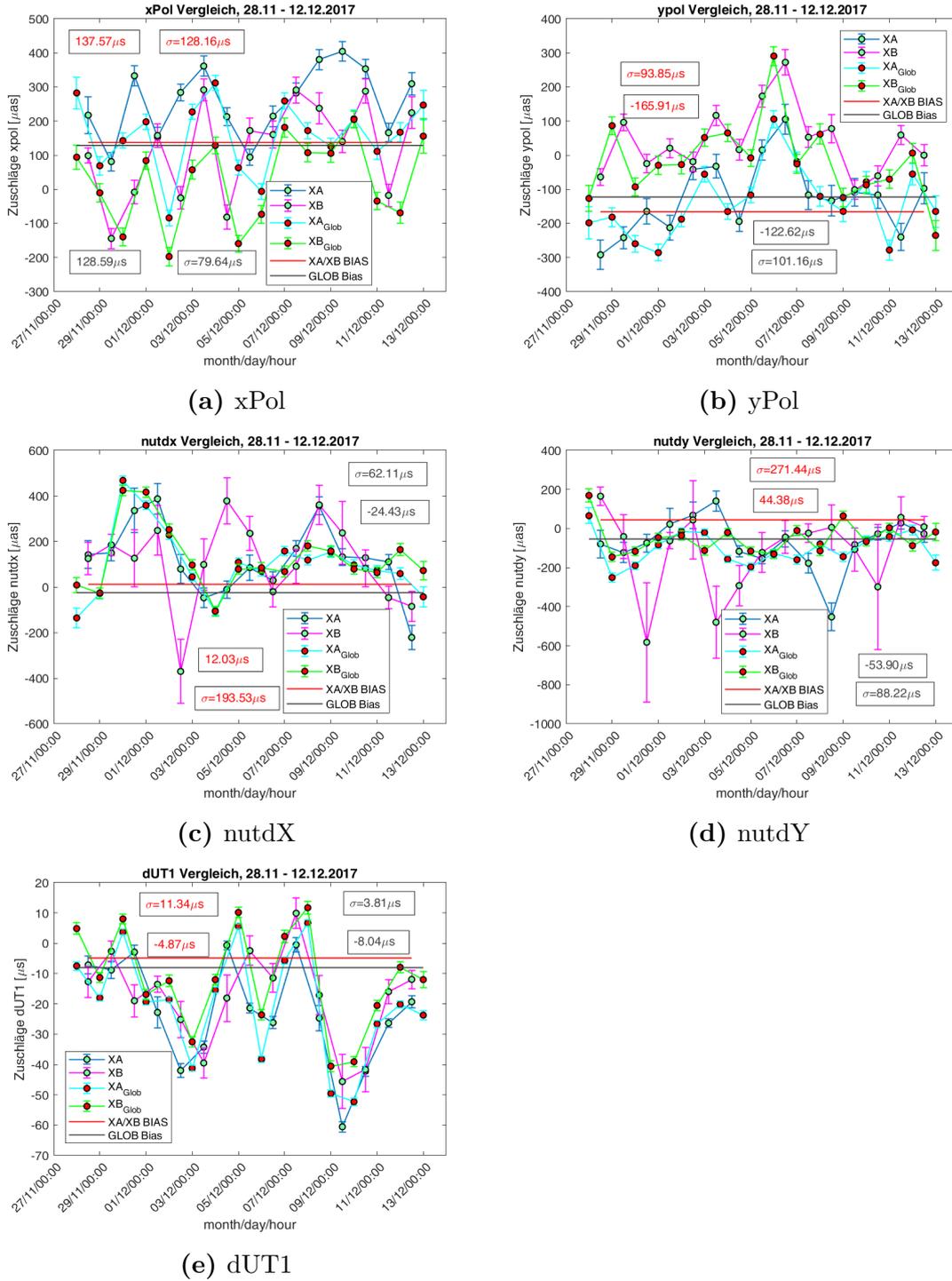


Abbildung 5.14: Vergleich der Biases von den beiden Netzwerken, einerseits als *single session* Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abb. 5.10), andererseits als globale Lösung (Abb. 5.13).

als beim dUT1 Wert. Hier erzielt die Lösung ohne das Schätzen der Nutationsparameter einen Offset von $\sim 118 \mu\text{as}$ (Abb. 5.15a) und ist damit um $\sim 11 \mu\text{as}$ niedriger als mit Schätzung der Nutationsparameter (Abb. 5.13a). Mit $\sim 88 \mu\text{as}$ ist die Stan-

Standardabweichung jedoch um $\sim 8 \mu\text{s}$ höher. Bis auf eine Ausnahme werden die Tage mit den größten Abweichungen mit Schätzung der Nutationsparameter kleiner als ohne Schätzung.

In y-Richtung der Polkoordinate beträgt der Offset $\sim -106 \mu\text{s}$ (Abb. 5.15b). Im Gegensatz zur Lösung in Abschnitt 5.3.2.1 beschrieben, erzielt man einen um $\sim 17 \mu\text{s}$ kleineren Offset (Abb. 5.13b). Auch entspricht die Standardabweichung mit $\sim 97 \mu\text{s}$ einen um $\sim 4 \mu\text{s}$ kleineren Wert als mit Schätzung der Nutationsparameter. Beim Vergleich der einzelnen Tagesdifferenzen kann festgestellt werden, dass die größten tageweisen Abweichungen aus Abschnitt 5.3.2.1, bis auf eine Ausnahme, ohne die Nutationsparameter verringert werden können.

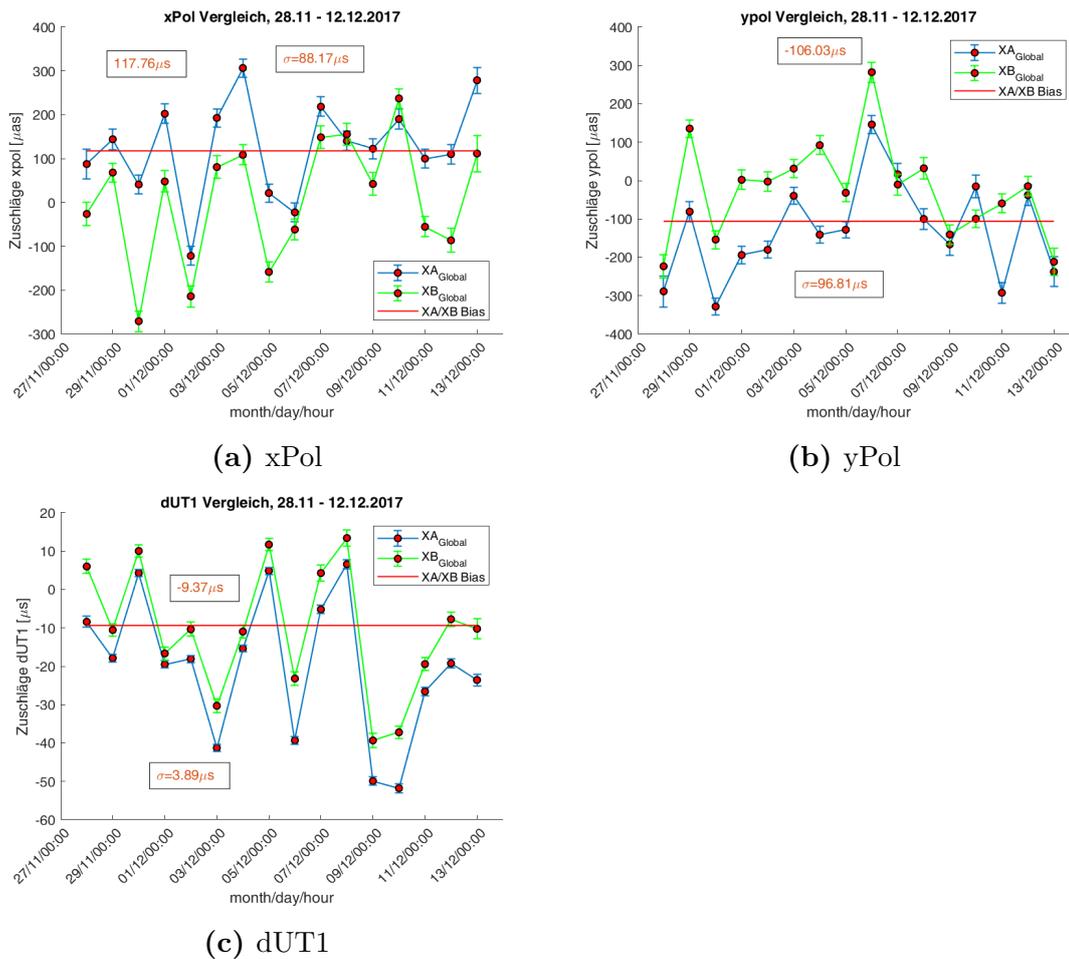


Abbildung 5.15: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter der globalen Lösung, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3).

5.3.2.3 Biases ERP 60 Minuten

In Abb. 5.16 sind die Ergebnisse der globalen Lösung mit Schätzung der Erdrotationsparameter (ERP) alle 60 Minuten gegeben, statt wie in Abschnitt 5.3.2.1 und

Abschnitt 5.3.2.2 alle 1440 Minuten⁶. Da bei der stundenweisen Schätzung die Nutationsparameter nicht mitgeschätzt werden, wird hier nur ein Vergleich zur globalen Lösung ohne der Nutation mit der tageweisen Schätzung der ERP (dUT1, xPol, yPol) aus Abschnitt 5.3.2.2 gegeben.

Der Mittelwert der dUT1 Differenzen beträgt $\sim 7 \mu s$. Dies ist im Vergleich zum Offset der tageweisen Schätzung von dUT1 (Abb. 5.15c) um $\sim 2 \mu s$ niedriger. Die Standardabweichung erhöht sich um $\sim 10 \mu s$ auf $\sim 14 \mu s$. Wenn man die Abweichungen der einzelnen Tage näher betrachtet, erkennt man, dass es für die stundenweise Schätzung 105 verschiedene Stunden gibt, in welchen die Abweichung höher als die größte der tageweisen Schätzung ist. Der größte Differenzwert wird am 6.12. um 20 Uhr mit $\sim 59 \mu s$ berechnet. Die Schätzung mit höherer Auflösung bedingt also größere Werte in Mittelwert und Standardabweichung der Differenzen.

Für den Offset des x-Polparameter Zuschlags (Abb. 5.16a) wird ein Wert von $\sim 124 \mu s$ im Vergleich zur tageweisen Schätzung (Abb. 5.15a) mit $\sim 118 \mu s$ berechnet. Von $\sim 88 \mu s$ auf $\sim 255 \mu s$ wird jedoch die Standardabweichung erhöht, was eine prozentuale Zunahme von 190% bedeutet. Die größte Abweichung befindet sich am 9.12. um 12:00 Uhr mit $\sim 885 \mu s$. Im Vergleich dazu beträgt der größte Unterschied der tageweisen Schätzung $\sim 312 \mu s$.

Der Offset der beiden Netzwerke bezüglich des y-Pol Wertes (Abb. 5.16b) beträgt $\sim 151 \mu s$ und ist damit um $\sim 45 \mu s$ höher als mit dem tageweisen Schätzen (Abb. 5.15a). Die Standardabweichung erhöht sich, wie bei den anderen beiden Parametern auch, um $\sim 197 \mu s$ auf $\sim 294 \mu s$. Bei der stundenweisen Schätzung gibt es vier Stunden, die einen Differenzwert größer als $\sim 1000 \mu s$ aufweisen. Insgesamt gibt es 182 Stunden, die größere Abweichungen als den größten Wert von $\sim 233 \mu s$ der tageweisen Schätzung zeigen.

5.3.2.4 Vergleich der Biases der globalen Lösung

Zur besseren Übersicht ist in Tabelle 5.2 und Abb. 5.17 eine Auflistung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen zwischen den beiden Netzwerken für alle fünf EOP mit den verschiedenen Auswertestrategien aus den Abschnitten 5.3.2.1 bis 5.3.2.3 gegeben. Außerdem wird in Tabelle 5.2 noch der formale Fehler der Berechnung der EOP angezeigt. Der hier angezeigte formale Fehler beschreibt den Mittelwert der formalen Fehler von allen Tagen. Mit den Standardparametern aus Tabelle 5.2 ist die Auswertung nach Abschnitt 5.3.2.1 gemeint. Für die Strategien Nutation fixiert (Abschnitt 5.3.2.2) und ERP60 (Abschnitt 5.3.2.3) werden in Tabelle 5.2 keine Werte für die Nutation angezeigt, da hier die Nutationsparameter auf die *a priori* Werte fixiert wurden.

Der formale Fehler der globalen Lösung (Tabelle 5.2) ist für beide Netzwerke um einiges geringer als mit der *single session* Lösung aus Abschnitt 5.3.1.3. Alle fünf Standardabweichungen des XA- und XB-Netzwerkes werden verringert. Für eine Erklärung dazu siehe Kapitel 6. Generell lässt sich eine Verbesserung der globalen Lösung zur *single session* Lösung anhand der beiden Nutationsparametern erkennen. Hier werden der Mittelwert und die Standardabweichung der Differenzen deutlich verringert.

Der formale Fehler ohne Schätzung der Nutationsparameter (Tabelle 5.2) zeigt

⁶1440 Minuten = 1 Tag

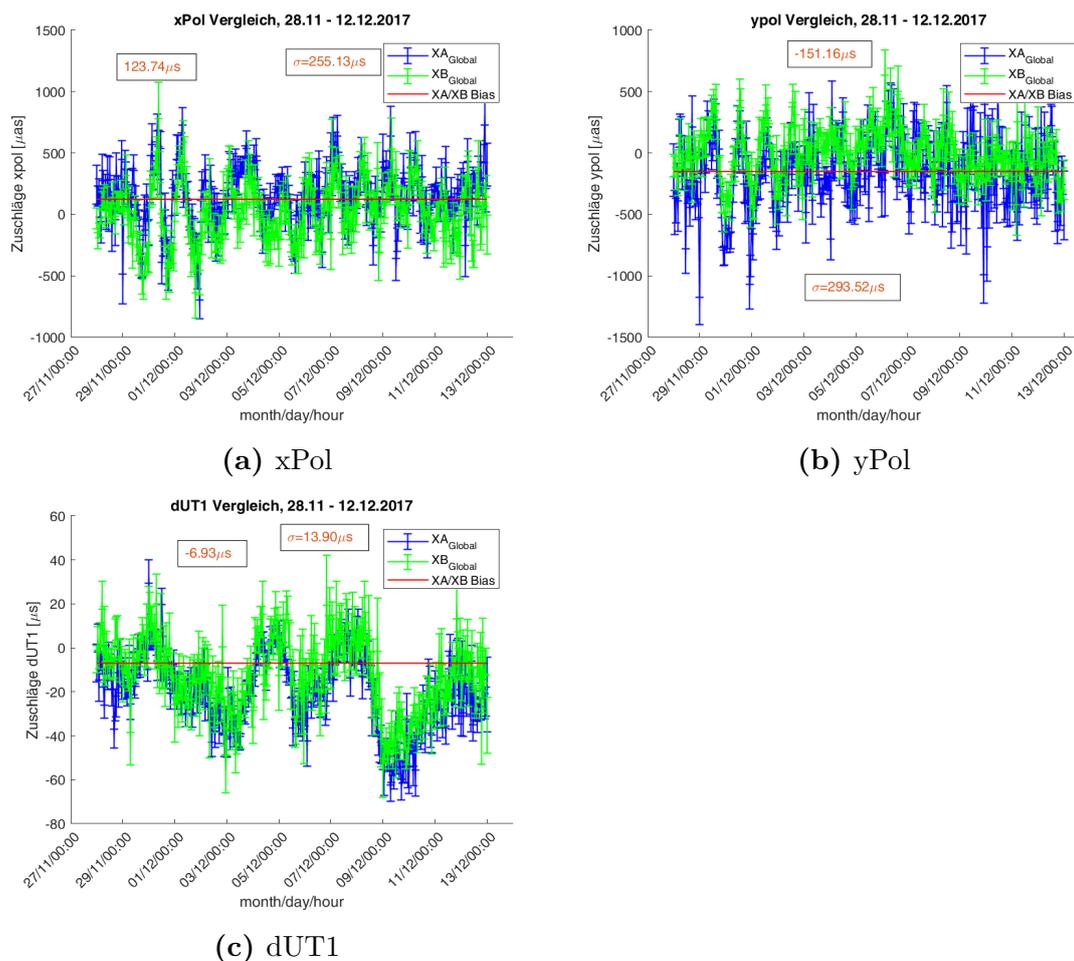


Abbildung 5.16: Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter in einem Schätzintervall von 60 Minuten, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3).

in dem dUT1 Parameter für beide Netzwerke keine Veränderung. Für die beiden Polkoordinaten lässt sich jedoch eine geringe Verbesserung für beide Netzwerke erkennen.

Der formale Fehler von den drei ERP (Tabelle 5.2) zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Biases (siehe Abschnitt 5.3.2.3). Auch die Standardabweichung wird in allen drei Fällen deutlich erhöht im Vergleich zur Lösung aus Abschnitt 5.3.2.1.

5.4 Zusammenhang der Stationskoordinaten mit EOP

Ein deutlicher Zusammenhang der Zuschläge zu den *a priori* Stationskoordinaten und den EOP kann sowohl für die *single session* Lösung als auch für die globale Lösung nicht gefunden werden. Es kann lediglich erkannt werden, dass für die Station

Tabelle 5.2: Formaler Fehler der Berechnung des XA- und XB-Netzwerkes der globalen Lösung mit den verschiedenen Auswertestrategien aus Abschnitt 5.3.2. Außerdem eine Übersicht des Offsets zwischen den berechneten Erdorientierungsparametern des XA- und XB-Netzwerkes und die Standardabweichung (SD) der EOP Differenzen. Alle Werte sind in μas bzw. für dUT1 in μs angegeben.

dUT1			
	Standardparameter	Nutation fixiert	ERP60
Formaler Fehler XA	1.1	1.1	3.9
Formaler Fehler XB	1.8	1.8	6.6
Offset XA/XB	-8.0	-9.4	-6.9
SD XA/XB	3.8	3.9	13.9
xPol			
	Standardparameter	Nutation fixiert	ERP60
Formaler Fehler XA	26.3	23.1	78.5
Formaler Fehler XB	28.6	25.4	89.1
Offset XA/XB	128.6	117.8	123.7
SD XA/XB	79.6	88.2	255.1
yPol			
	Standardparameter	Nutation fixiert	ERP60
Formaler Fehler XA	29.0	26.8	90.3
Formaler Fehler XB	28.5	25.9	93.1
Offset XA/XB	-122.6	-106	-151.2
SD XA/XB	101.2	96.8	293.5
dX			
	Standardparameter	Nutation fixiert	ERP60
Formaler Fehler XA	23.5	-	-
Formaler Fehler XB	24.8	-	-
Offset XA/XB	-24.4	-	-
SD XA/XB	62.1	-	-
dY			
	Standardparameter	Nutation fixiert	ERP60
Formaler Fehler XA	23.7	-	-
Formaler Fehler XB	25.4	-	-
Offset XA/XB	-53.9	-	-
SD XA/XB	88.2	-	-

WETTZ13N sehr hohe Zuschläge zu den *a priori* Stationskoordinaten berechnet werden. Sowohl in der *single session* als auch in der globalen Lösung unterscheidet sich der Zuschlag in der x- und y-Koordinate von WETTZ13N um bis zu 90% zu

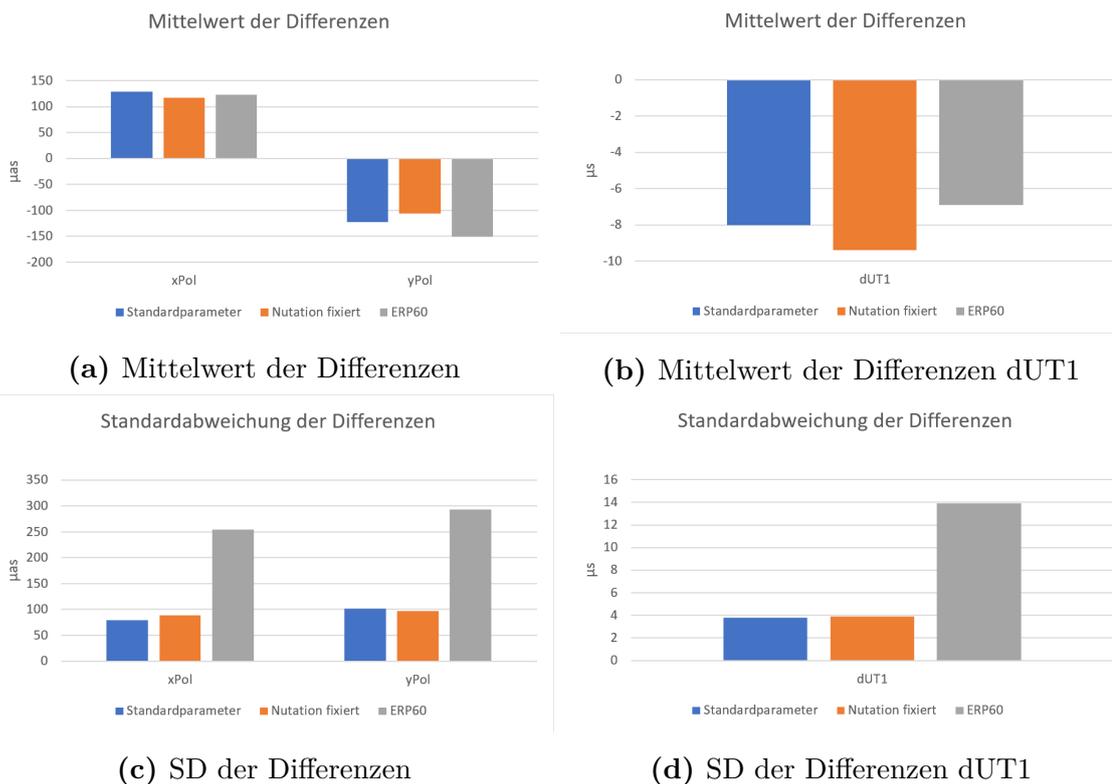


Abbildung 5.17: Diagramme der Biases (Mittelwert und SD) der ERP mit den verschiedenen Auswertestrategien der globalen Lösung.

den anderen Stationen. Bei dieser Antenne handelt es sich um eines der beiden Twin Teleskope der Station Wettzell. Durch die sehr hohen Zuschläge kann lediglich gesagt werden, dass diese Station noch keine stabilen *a priori* Stationskoordinaten zur Verfügung hat.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Kapitel 6

Diskussion und Vergleich der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden in Abschnitt 6.1 die Ergebnisse aus Kapitel 5 diskutiert. Des Weiteren wird mit den im Vorfeld erwartbaren Genauigkeiten der CONT17 Kampagne aus Abschnitt 3.4 (in Abschnitt 6.2.1) und zwei eingangs erwähnten Publikationen (in Abschnitt 6.2.2) ein Vergleich gezogen.

6.1 Diskussion

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden verschiedene Methoden angewandt, um die Daten der CONT17 Kampagne auszuwerten. Bei der CONT17 Kampagne wurde mit zwei unabhängigen Netzwerken beobachtet, die eine unterschiedliche Verteilung der Stationen auf der Erde haben. Die Sensitivität der Erdorientierungsparameter hängt nach Schuh (1999) hauptsächlich von der Geometrie der Verteilung der Stationen ab. Für die Sensitivität auf den dUT1 Parameter ist eine gute Ausdehnung der Stationen in Ost-West Richtung erforderlich. Für eine gute Sensitivität auf beide Polkoordinaten wird ein Netzwerk mit einer Verteilung der Stationen in Nord-Süd Richtung verwendet. Die x-Polkoordinate hängt unter anderem von den Basislinien Komponenten in x- und z-Richtung ab, die y-Polkoordinate von den Komponenten in y- und z-Richtung (Schuh, 1999). Die Station YARRA12M ist die Einzige auf der südlichen Hemisphäre liegende Antenne des XA-Netzwerkes. Dies lässt auf eine geringere Sensitivität auf die Polparameter schließen. Die Ausdehnung dieses Netzwerkes erstreckt sich jedoch besser in Ost-West Richtung (Abb. 3.2) und ist aufgrund der Geometrie sensitiver auf den dUT1 Parameter als das XB-Netzwerk. Das XB-Netzwerk ist für eine gute Ost-West Ausdehnung hauptsächlich von der am westlichsten liegenden Station FORTLEZA abhängig. Dieses ist daher weniger sensitiv auf den dUT1 Parameter. In der südlichen Hemisphäre befinden sich sogar mit FORTLEZA, HART15M, HOBART26, KATH12M und WARK12M gleich fünf Stationen. Die Polparameter sind daher theoretisch besser mit dem XB- als mit dem XA-Netzwerk zu bestimmen.

Im ersten Durchlauf mit den Standardparametern werden für die beiden Nutationsparameter, sowie dUT1 des XB-Netzwerkes, teils sehr große Zuschläge zu den

a priori Werten berechnet. Speziell für den 12.12. wurde ein möglicher Ausreißer entdeckt, der sich stark von den übrigen Tagen unterscheidet.

Die mittlere Abweichung der dUT1 Differenzen (XA-XB) ist, trotz des möglichen Ausreißers vom 12.12. des XB-Netzwerkes, sehr gering. Dies lässt sich damit erklären, dass bei der Berechnung des Offsets die Vorzeichen des jeweiligen Zuschlages einbezogen werden. Es wird kein Betrag der Differenz berechnet. Die Abweichung der einzelnen Tage wird als Differenz Zuschlag des XA-Netzwerkes des jeweiligen Tages minus Zuschlag des XB-Netzwerkes berechnet. Der Offset der kompletten Messkampagne, des jeweiligen Erdorientierungsparameters, resultiert aus dem Mittelwert von allen Tagen. Da sich die Zuschläge des XA-Netzwerkes größtenteils weiter im negativen Bereich befinden als die des XB-Netzwerkes, befinden sich die einzelnen Tagesabweichungen hauptsächlich im negativen Bereich. Durch den enorm großen negativen Zuschlag des XB-Netzwerkes vom 12.12. befindet sich die Differenz an diesem Tag im stark positiven Bereich und zieht daher auch den Mittelwert aller Tage in den positiven Bereich. Daher ist die Abweichung der dUT1 Werte von beiden Netzwerken im Mittel mit nur $\sim 0.75 \mu s$ sehr gering. Durch den sehr großen Zuschlag des XB-Netzwerkes vom 12.12. wird jedoch die Standardabweichung der Differenzen aller Tage sehr groß.

Sowohl bei den Zuschlägen im Allgemeinen als auch bei den Biases der beiden terrestrischen Polkoordinaten zeigen sich keine Auffälligkeiten. Der sehr auffällige Ausreißer des XB-Netzwerkes vom 12.12. ist nur im dUT1 Parameter sowie in den beiden Nutationsparametern erkennbar. Es lässt sich hier keine Verbindung zur Polbewegung feststellen.

Der formale Fehler des XA-Netzwerkes mit der Lösung der Standardparameter (Tabelle 5.1) ist bis auf die Nutation in x-Richtung immer kleiner als der des XB-Netzwerkes. Dies spricht für eine generell bessere interne Konsistenz des XA-Netzwerkes. Da vor allem im XB-Netzwerk am 12.12. die Station HOBART26 noch nicht ausgeschlossen wurde, die für den Ausreißer verantwortlich ist, wird der formale Fehler von diesem Netzwerk erheblich größer.

Der Ausschluss der Station HOBART26 des XB-Netzwerkes vom 12.12. bringt eine Vielzahl an Verbesserungen in der Berechnung der EOP. Da die Station HOBART26 in Tasmanien die am südlichsten liegende Station des XB-Netzwerkes ist, könnte die nicht Berücksichtigung eine Beeinträchtigung der Polparameter mit sich bringen. Jedoch befindet sich die nächstgelegene Antenne WARK12M in Neuseeland und liegt daher nur um ein paar Grad nördlicher als die Station HOBART26.

Der Offset des dUT1 Parameters vergrößert sich zwar, jedoch verringert sich die Standardabweichung durch den Ausschluss erheblich. Von beiden Nutationsparametern werden die Biases in der Gesamtheit reduziert. Eine deutliche Verbesserung durch den Ausschluss ist in der Verkleinerung des formalen Fehlers des dUT1 Parameters und den beiden Nutationsparametern ersichtlich. Die fehlerhafte Messung der Station HOBART26 am 12.12. hat daher den formalen Fehler dieser drei Parameter vergrößert. Im XB-Netzwerk sind, speziell in den beiden Nutationsparametern, immer noch Tage mit sehr hohen formalen Fehlern vorhanden. Dies könnte auf weitere Probleme bei einzelnen Beobachtungen hindeuten. Eine Verminderung der formalen Fehler dieser Tage konnte in der *single session* Lösung nicht erzielt werden.

Weniger sensibel auf den Ausreißer vom 12.12. sind die beiden terrestrischen Polparameter. Hier ist weder im formalen Fehler noch im Bias zwischen den Netzwerken

eine große Veränderung durch den Ausschluss der Station HOBART26 erkennbar. Einen negativen Einfluss durch das Entfernen der am südlichsten liegenden Station und daher für die Polparameter eine Beeinträchtigung der Sensitivität, ist nicht erkennbar.

Anhand der Ergebnisse lässt sich erkennen, dass durch das Entfernen der Station HOBART26 die formalen Fehler der dUT1 und Nutationsparameter der kompletten Session deutlich besser werden. Dies kann damit erklärt werden, dass durch eine mangelhafte Messung an einem Tag auch der formale Fehler dieser Messung erhöht wird. Da der hier beschriebene Fehler einen Mittelwert der Fehler der Sessions darstellt, ist die deutliche Verbesserung ohne den Ausreißer vom 12.12. des XB-Netzwerkes keine Überraschung. Verwunderlich ist jedoch die kaum merkbare Veränderung des Offsets und des formalen Fehlers in den terrestrischen Polkoordinaten trotz des Weglassens der am südlichsten liegenden Station des Netzwerkes. Was jedoch auffällt ist bei genauerer Betrachtung des Unterschiedes vom 12.12., zwischen den beiden Netzwerken der beiden Polkoordinaten, der etwas höhere Wert im Gegensatz zu den Standardparametern. Diese Beobachtung lässt sich sehr gut mit dem Wegfall der am südlichsten liegenden Station des XB-Netzwerkes erklären. Dadurch wird die Ausdehnung des Netzwerkes in Nord-Süd Richtung verkleinert, was wie oben bereits beschrieben eine geringere Sensitivität für die Polparameter zur Folge hat. Da sich die Station WARK12M nur um ein paar Grad nördlicher befindet, fällt der Wegfall der Station HOBART26 anhand der in dieser Diplomarbeit beobachteten Ergebnisse nicht weiter ins Gewicht.

Das Entfernen der Station HOBART26 ist daher, trotz der Verschlechterung der Geometrie des XB-Netzwerkes vom 12.12., durchaus sinnvoll für eine Verbesserung der Genauigkeit der Erdorientierungsparameter.

Die Verringerung des Schätzintervalls des feuchten Anteils der Troposphäre von 60 auf 30 Minuten sowie die Verringerung der Gradienten von 360 auf 180 Minuten, wirkt sich insgesamt positiv auf die Schätzung der EOP aus. Der Offset kann für die beiden Nutationsparameter und den Polparameter in y-Richtung erneut verringert werden. Für den dUT1 Parameter und den Pol in x-Richtung wird zwar der Mittelwert der Abweichungen erhöht, die Standardabweichung wird aber in allen fünf Fällen deutlich verringert. Auf den formalen Fehler der Berechnung hat die Veränderung des Schätzintervalls keine Auswirkung.

Durch das Festsetzen der Nutationsparameter auf ihre *a priori* Werte, kommt es zu leicht besseren formalen Fehlern als in den vorher beschriebenen Lösungen. Für die Transformation zwischen dem erdfesten und himmelfesten Referenzrahmen werden, statt den drei Eulerwinkeln, die fünf EOP und der CIP verwendet. Aufgrund dessen hängen die Nutation und die Polbewegung voneinander ab (Gross, 2007) (siehe Abschnitt 2.1.3.2). Diese Abhängigkeit wirkt sich beim Fixieren eines oder mehrerer Parameter auf die gesamte Ausgleichung und dadurch auch auf die formalen Fehler der geschätzten Parameter aus. Im vorliegenden Fall ist die Veränderung der formalen Fehler der Polkoordinaten aber so minimal, dass man nicht von einer signifikanten Verbesserung sprechen kann. An sich bedingt das Festsetzen der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte, dass mögliche Fehler der *a priori* Werte sich aufgrund des mathematischen Zusammenhangs auf andere Parameter, wie ERP, Stations- oder Quellenkoordinaten übertragen.

In der globalen Lösung wird ein Koordinatenrahmen für die komplette Messkampagne geschätzt. Das heißt das geodätische Datum bleibt über alle Sessions gleich und wird nicht wie in der *single session* jeden Tag neu geschätzt. Dies wirkt sich vor allem auf den formalen Fehler aus, der dadurch drastisch reduziert wird. Der Fehler, der durch eine tägliche Neubestimmung der Stationskoordinaten verursacht wird, kann durch eine gemeinsame Berechnung des Rahmens in der globalen Lösung vermieden werden. Außerdem hängt der geschätzte Zuschlag der EOP zum jeweiligen Tag in der globalen Lösung, durch das Setzen von lockeren Zwängen, auch von den angrenzenden Tagen ab. Im Vergleich dazu sind die Stationskoordinaten und EOP der *single session* Lösungen für jeden Tag völlig unabhängig voneinander. Die Biases zwischen den beiden Netzwerken, sowie die formalen Fehler der EOP können durch die globale Lösung im Gegensatz zur *single session* minimiert werden. Die beiden Netzwerke passen dadurch besser zueinander und zeigen geringere Offsets und Standardabweichungen in der globalen Lösung.

Ohne Schätzung der Nutationsparameter wird in der globalen Lösung der formale Fehler der Polkoordinaten, wie auch in der *single session*, geringfügig kleiner. Die Abhängigkeit der Polbewegung mit der Nutation und deren Konsequenzen für die Parameterschätzung wurde bereits im Absatz zur entsprechenden *single session* Lösung diskutiert. Das Nicht Schätzen der Nutation zeigt zwar einen kleineren Offset der Polkoordinaten jedoch eine größere Standardabweichung der Differenzen der Polbewegung als mit Schätzung der Nutation.

Die Schätzung der Erdrotationsparameter in einem Intervall von 60 Minuten bedingt gewisse Einschränkungen. In der sub-täglichen Berechnung der EOP kann die Nutation nicht mehr von der Polbewegung unterschieden werden. Entgegen der Erddrehung (retrograd) ist die Bewegung des CIP im TRF im Bereich von -1.5 cpsd bis -0.5 cpsd als Nutation festgelegt (Gross, 2007). Nach Artz (2011) wird diese Korrelation der Polbewegung und Nutation in der täglichen Berechnung der EOP durch die Beobachtung von länger als 24 Stunden dauernden Sessions vermieden. Da sich die Erde einmal um die eigene Achse dreht können beide Parameter de-korreliert werden. Für die sub-tägliche Berechnung müssen die Nutationsparameter auf ihre *a priori* Werte gesetzt werden (Artz, 2011). Problem ist, dass sich durch das Festsetzen der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte, Fehler der *a priori* Werte auf die Polbewegung auswirken (Nilsson et al., 2010).

Die höhere Auflösung der ERP fällt zu Lasten einerseits der Genauigkeit, die in den höheren formalen Fehlern sichtbar ist und andererseits können Nutationsparameter nicht mit geschätzt werden. Auch vergrößert sich der Offset zwischen den beiden Netzwerken im Gegensatz zur täglichen Schätzung. Es können jedoch durch die höhere Auflösung im Stundenbereich Zuschläge sichtbar gemacht werden, die mit einer täglichen Auflösung nicht möglich wären. Solche sind im sub-täglichen Bereich der Polbewegung z.B. die Ozeangezeiten (Petit und Luzum, 2010). Eine genauere Untersuchung im Frequenzbereich, welche sub-tägliche Perioden zeigen könnte, wurde in dieser Diplomarbeit nicht weiter verfolgt. Für einen Vergleich der Ergebnisse mit der sub-täglichen Schätzung der ERP mit denen der Publikation von Böhm, S. et al. (2019) siehe Abschnitt 6.2.2.

Generell zeigen die berechneten Zuschläge zu den *a priori* EOP sowohl in der *single session* Lösung als auch in der globalen Lösung hohe Werte auf. Es werden da-

durch teilweise hohe Abweichungen ersichtlich. Die *a priori* Werte der EOP 14 C04¹ Zeitserien, in Beziehung zum IAU 2006/2000A Präzession-Nutationsmodell und des Referenzrahmens ITRF2014, sind Kombinationsprodukte von verschiedenen geodätischen Weltraumverfahren. Zwischen den Lösungen der verschiedenen Verfahren ist bekannt, dass systematische Abweichungen durchaus vorkommen können (Böhm, S. et al., 2019). Deswegen ist es nicht verwunderlich, dass sich die in dieser Arbeit berechneten Zuschläge der EOP mit der Methode der VLBI von den *a priori* Werten unterscheiden und teilweise hohe Zuschläge berechnet werden. Es werden generell für das XB-Netzwerk höhere formale Fehler berechnet als mit dem XA-Netzwerk. Dies lässt auf einer bessere interne Konsistenz der Messungen dieses Netzwerkes schließen. Wenn man sich den Mittelwert der Zuschläge der beiden Netzwerke einzeln anschaut (Tabelle 6.1), dann erkennt man, dass die Zuschläge für die beiden Polparameter des XB-Netzwerkes viel geringer sind als die des XA-Netzwerkes. Dies kann man mit der besseren Sensitivität des XB-Netzwerkes auf die Polparameter aufgrund der größeren Nord-Süd Ausdehnung erklären. Mit dem XA-Netzwerk werden im Mittel größere Zuschläge berechnet (positiv und negativ) als mit dem XB-Netzwerk. Bei Betrachtung der Zuschläge zu dem y -Polparameter (z.B. Abb. 5.13b und 5.15b) lässt sich eine gewisse systematische Abweichung zwischen den beiden Netzwerken erkennen. Dies lässt sich ebenfalls mit der besseren Nord-Süd Ausdehnung des XB-Netzwerkes erklären. Auffällig ist der hohe Zuschlag von beiden Netzwerken des Nutationsparameters in y -Richtung zwischen dem 30.11. und 1.12. Hier könnte es sich um Fehler des *a priori* Nutationsmodelles handeln, da die Zuschläge von beiden CONT17 Netzwerken gleichermaßen beobachtet wurden.

Generell wird gezeigt, dass es durch die unterschiedliche geometrische Verteilung der Netzwerke zu abweichenden EOP-Schätzwerten der beiden Netzwerke kommt. Mittels der globalen Lösung kann der Bias zwischen den Netzwerken jedoch möglichst gering gehalten werden. Im Gegensatz zur Einzellösung werden die formalen Fehler (=Standardabweichungen) der Berechnung durch die gemeinsame Ausgleichung aller Sessions in der globalen Lösung minimiert.

Als letztes Qualitätsmerkmal wird für die beiden CONT17 Netzwerke noch das Volumen der Netzwerke nach Malkin (2009) berechnet. Das Volumen eines Beobachtungsnetzwerkes kann als Qualitätsfaktor für die EOP angesehen werden. Als Volumen wird hier ein Polyeder mit den einzelnen Antennen als Eckpunkte angesehen. Malkin (2009) hat herausgefunden, dass das Netzwerkvolumen und die EOP Fehler invers voneinander abhängen. Je größer das Volumen wird, desto kleiner werden die Fehler. Als Fehler wird hier die Präzision, oder die Genauigkeit angesehen. Die Präzision ist die Wiederholbarkeit der Ergebnisse, die Genauigkeit ist der Vergleich mit den wahren Werten (z.B. die IGS Lösung) (Malkin, 2009). Die Mittelwerte des Netzwerkvolumens des XA- und XB- Netzwerkes von allen Tagen werden mit $119Mm^3$ (Kubik Megameter) und $369Mm^3$ berechnet. Es kann anhand der in dieser Diplomarbeit berechneten Werte (siehe z.B. Tabelle 5.2) auf keine Abhängigkeit des Netzwerkvolumens mit den formalen Fehlern geschlossen werden. Die formalen Fehler des XA-Netzwerkes sind minimal niedriger als die des XB-Netzwerkes, obwohl das Netzwerkvolumen von XA deutlich geringer ist. Laut Malkin (2009) kann die Behauptung der inversen Abhängigkeit nicht auf jede beliebige VLBI Session angewandt werden. Als Grund dafür sind verschiedene Parameter der Beobachtung

¹<https://www.iers.org/IERS/EN/DataProducts/EarthOrientationData/eop.html>

angegeben, wie z.B. die Orientierungen der Basislinien, Parameter der Planung, oder einzelne Qualitätsparameter einer Antenne. Es kann mit den Werten dieser Arbeit nur darauf geschlossen werden, dass die geringeren formalen Fehler des XA-Netzwerkes auf eine bessere interne Konsistenz hinweisen.

6.2 Vergleich der Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt 6.2.1 werden die Ergebnisse aus Abschnitt 5.3.2 noch mit den im Vorfeld der CONT17 Kampagne erwarteten Genauigkeiten der Erdorientierungsparameter (Abschnitt 3.4) verglichen. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit werden außerdem noch mit denen der Publikationen von Böhm, S. et al. (2019) und Nilsson et al. (2019) verglichen, die ebenfalls die EOP mittels der Daten der CONT17 Kampagne analysieren (Abschnitt 6.2.2).

6.2.1 Erwartete Genauigkeit

Im Vergleich zu den im Vorfeld erwarteten formalen Fehlern (Tabelle 3.3) aus der Publikation von Behrend et al. (2017) sind die in dieser Arbeit erreichten formalen Fehler mit der globalen Lösung, bis auf die Nutationsparameter in x-Richtung, größer. Erwähnt werden muss, dass es sich bei den erwarteten Ergebnissen um simulierte formale Fehler handelt, die sich von den tatsächlich erreichten unterscheiden können. Die simulierten Ergebnisse gelten nur für den Fall, dass es während der Beobachtung zu keinen Komplikationen kommt und alle Stationen für den kompletten Zeitraum zur Verfügung stehen. In der Realität war dies während der Beobachtungskampagne jedoch nicht der Fall (für eine genauere Beschreibung dazu siehe Kapitel 3) (Behrend et al., 2017). Mit einem Faktor von 1.5-1.8 multipliziert kommt man nach Behrend et al. (2017) zu deutlich realistischeren Resultaten. Dies zeigt sich auch im Vergleich zu den in dieser Diplomarbeit gezeigten Ergebnissen der globalen Lösung (Tabelle 5.2, Standardparameter). Durch die Multiplikation mit 1.5-1.8 der Werte aus Tabelle 3.3 erkennt man eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Tabelle 5.2 (Standardparameter). Im Vergleich zu der CONT11 und CONT14 werden für die CONT17 Kampagne größere formale Fehler erwartet. Die Netzwerke der CONT11 und CONT14 Kampagne hatten eine bessere geographische Verteilung der Stationen, sowie eine höhere Anzahl an teilnehmenden Stationen als die der beiden *Legacy* Netzwerke. Die Aufteilung in zwei global möglichst gleich verteilte Netzwerke der CONT17 Kampagne hatte den Zweck mögliche systematische Abweichungen (Biases) in der EOP Bestimmung aufzuzeigen (Behrend et al., 2017).

Im Idealfall sollten beide Netzwerke die gleichen EOP messen, in der Realität ist dies jedoch nicht der Fall, da die Sensitivität für bestimmte EOP, wie bereits beschrieben von der Geometrie der Verteilung der Stationen abhängt. Da die beiden *Legacy* Netzwerke jedoch eine unterschiedliche Verteilung sowohl in Nord-Süd als auch in Ost-West Richtung zeigen, sind berechnete Biases der EOP zwischen den beiden Netzwerken durchaus erklärbar.

6.2.2 Vergleich mit zwei ausgewählten Publikationen

In den folgenden beiden Abschnitten (Abschnitte 6.2.2.1 und 6.2.2.2) wird ein Vergleich der Werte dieser Diplomarbeit mit jenen von zwei Veröffentlichungen von Böhme, S. et al. (2019) und Nilsson et al. (2019) durchgeführt.

6.2.2.1 Vergleich mit Böhme, S. et al. (2019)

Für einen Vergleich der in dieser Arbeit berechneten ERP in einem Intervall von 60 Minuten (Tabelle 6.1) zu der Publikation von Böhme, S. et al. (2019) wird zusätzlich der *root mean square* (RMS) mit der in MATLAB verfügbaren Funktion *rms* nach der Gleichung (6.1), mit vorher abgezogenem Trend, berechnet. N beschreibt hier die Anzahl der Werte und x_i den berechneten Zuschlag der EOP.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i|^2} \quad (6.1)$$

Zur Erklärung, die in der Tabelle 6.1 gezeigten dUT1 Werte sind in der Einheit μs gegeben, wohingegen die Werte von Böhme, S. et al. (2019) in μas gegeben sind. Eine Umrechnung erfolgt nach folgendem Prinzip: $dUT1(\mu as) = dUT1(\mu s) * 15$.

Die in der Arbeit von Böhme, S. et al. (2019) gezeigten Abbildungen *figure 3a* und *3b* zeigen den *mean* und den *rms* der ERP Werte mit abgezogenem Trend. Die berechneten Werte der globalen Lösung mit Schätzung der ERP alle 60 Minuten (Tabelle 6.1, Abb. 5.16) unterscheiden sich kaum von denen der Publikation von Böhme, S. et al. (2019). Die Aussage über eine gute interne Konsistenz von Böhme, S. et al. (2019), aufgrund der sehr ähnlichen Größenordnung der RMS der EOP Zuschläge der einzelnen Netzwerke und der RMS der Differenzen, kann auch aus den Ergebnissen dieser Diplomarbeit (Tabelle 6.1) getroffen werden. Die RMS von allen drei ERP berechnet aus dem XA-, XB- Netzwerk und den XA/XB Differenzen, liegen im Bereich von ca. $250 \mu as^2$. In Böhme, S. et al. (2019) wurden die RMS Werte ebenfalls im Bereich von $250 \mu as$ berechnet.

6.2.2.2 Vergleich mit Nilsson et al. (2019)

In einem zweiten Vergleich werden die Ergebnisse dieser Diplomarbeit denen der Publikation von Nilsson et al. (2019) gegenübergestellt.

Um die Ergebnisse der EOP dieser Diplomarbeit mit jenen aus Nilsson et al. (2019) besser vergleichen zu können, wurde ein zweiter Datensatz herangezogen. Die Ergebnisse der globalen Lösung der CONT17 Kampagne (Abschnitt 5.3.2.1), wurden mit denen der IGS (*International GNSS Service*) Lösung³ während der gleichen 15 Tage verglichen. Mittels GNSS können nur die terrestrischen Polkoordinaten und der Wert LoD beobachtet werden. Aus LoD kann durch aufintegrieren von diesem und dem teilweisen Anhängen an die dUT1 Werte der VLBI, UT1-UTC (=dUT1) bestimmt werden (Böhme, J. und Schuh, 2013). Es können nur die zwei Polparameter und teilweise auch UT1-UTC miteinander verglichen werden. Hierbei muss erwähnt

²hier ist der Mittelwert des RMS aller Werte gemeint; dUT1 wurde für diese Berechnung in μas umgerechnet

³<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/>

Tabelle 6.1: Für das XA- und XB-Netzwerk wurden die ERP alle 60 Minuten geschätzt. Zeilen 1-3 zeigen die Mittelwerte (*mean*) der Zuschläge zu den *a priori* ERP (dUT1, xPol, yPol) des XA- und XB-Netzwerkes einzeln sowie den Mittelwert der Differenzen der beiden Netzwerke. In den Zeilen 4-6 befinden sich die berechneten *root mean square* (RMS) von jeweils beiden Netzwerken sowie der Differenz der beiden Netzwerke. Alle Werte sind in μas bzw. für dUT1 in μs angegeben

	dUT1	xPol	yPol
Mean XA	-19.6	145.9	-157.3
Mean XB	-12.7	22.1	-6.1
Offset XA/XB	-6.9	123.7	-151.2
RMS XA	16.1	244.6	298.5
RMS XB	17.0	246.3	207.6
RMS XA/XB	13.8	254.5	290.1

werden, dass die Werte der IGS Lösung nicht die Zuschläge zu den *a priori* Werten beschreiben, sondern bereits die endgültigen Werte sind. Deswegen müssen für den Vergleich auch die endgültigen Werte (*a priori*⁴+Zuschläge aus VLBI berechnet) der CONT17 Kampagne herangezogen werden.

Ein Vergleich der Polparameter, berechnet aus der VLBI, mit denen der IGS Lösung ist aufgrund des dichteren Stationsnetzes von GNSS Stationen durchaus sinnvoll. GNSS Stationen sind global sehr gut verteilt und beobachten auch durchgehend. Sie haben daher eine größere Genauigkeit in der Berechnung der Polparameter im Vergleich zu VLBI Beobachtungen (Schmidt et al., 2010).

Außerdem wird noch der WRMS (*weighted root mean square*) der Ergebnisse aus Abschnitt 5.3.2.1 mittels Gleichung (6.2) berechnet. Die Gleichung (6.2) wird hier anhand des WRMS der Differenz XA-XB gezeigt. XA bzw. XB beschreibt hier den gesamten Wert (Zuschlag+*a priori* EOP Wert) und σ den formalen Fehler der Berechnung.

$$WRMS = \sqrt{\frac{\sum \frac{(XA-XB)^2}{(\sigma_{XA}^2 + \sigma_{XB}^2)}}{\sum \frac{1}{(\sigma_{XA}^2 + \sigma_{XB}^2)}}} \quad (6.2)$$

In der Abhandlung von Nilsson et al. (2019) wird in einem ersten Vergleich auf den WRMS der EOP-Differenzen zwischen den beiden Netzwerken sowie den WRMS der Abweichungen zwischen den Netzwerken und einer kombinierten Lösung aus beiden Netzwerken eingegangen. Eine kombinierte globale Lösung zwischen zwei verschiedenen Netzwerken, die an den gleichen Tagen beobachtet haben, ist mit dem Programm VieVS nicht möglich, daher wird dieser Vergleich in dieser Arbeit nicht näher erläutert. Generell zeigen sich beim Vergleich des WRMS der Differenz von XA-XB aus Tabelle 6.2 mit denen aus der *figure 2* von Nilsson et al. (2019)

⁴https://datacenter.iers.org/data/latestVersion/224_EOP_C04_14.62-NOW.

deutlich größere berechnete Biases. Zu beachten gilt auch hier, dass der Wert dUT1 (UT1-UTC) in μs , statt wie in Tabelle 6.2 in μs gegeben ist.

Ein weiteres Experiment befasst sich mit dem Vergleich zu externen Daten der EOP. Diese sind die Daten der IGS *final solution*. Beim Vergleich muss beachtet werden, dass die in Tabelle 6.2 gezeigten LoD Werte in der Einheit $\frac{\mu\text{s}}{\text{day}}$ angegeben sind, wohingegen die Werte aus Nilsson et al. (2019) in $\frac{\mu\text{as}}{\text{day}}$ dargestellt sind. Die Umrechnung erfolgt wie beim dUT1 Wert. Die LoD Werte in Tabelle 6.2 wurden aus den dUT1 Werten der globalen Lösung dieser Diplomarbeit (Abschnitt 5.3.2.1), mit Formel (1) aus Landskron und Böhm, J. (2019), berechnet. Auch hier sind die in dieser Diplomarbeit berechneten WRMS der Differenzen der drei ERP zwischen den beiden Netzwerken und der IGS Lösung höher als die von Nilsson et al. (2019). Einzig die Aussage, dass jeweils der Bias zwischen dem XA- und XB-Netzwerk zur IGS Lösung für den x-Polparameter ungefähr im selben Bereich liegen, kann auch für die Ergebnisse dieser Diplomarbeit getroffen werden. Weiters passt der Wert des y-Polparameters, berechnet mit dem XB-Netzwerk, besser mit der IGS Lösung zusammen als mit dem XA-Netzwerk. Auch diese Erkenntnis stimmt mit der Arbeit von Nilsson et al. (2019) überein. Dies ergibt sich aus der Geometrie des XB-Stationsnetzwerkes, welches eine bessere Ausdehnung in Nord-Süd (z) Richtung hat. Für eine gute Sensitivität auf den y-Polparameter ist unter anderem eine gute Ausdehnung der Basislinien Komponenten in y- oder z-Richtung nötig (Schuh, 2000). Ebenfalls kann wie in Nilsson et al. (2019) eine bessere Übereinstimmung der IGS Lösung mit der des XA-Netzwerkes bezüglich des LoD Parameters festgestellt werden. Wie in Schuh (2000) und oben schon beschrieben ist für eine gute Sensitivität des dUT1 (oder LoD) Parameters eine große Ausdehnung der Stationen in Ost-West Richtung notwendig. Diese ist für das XA- Netzwerk besser als für das XB-Netzwerk.

Tabelle 6.2: Vergleich der gesamten (*a priori*+Zuschläge) ERP einer globalen Lösung der CONT17 Kampagne (XA- und XB-Netzwerk) mit denen der IGS Lösungen. Es ist sowohl der *weighted root mean square* (WRMS) der Differenz des XA- und XB-Netzwerkes als auch der WRMS der beiden Netzwerke einzeln mit den IGS Lösungen gegeben. Für den Bias des WRMS zwischen dem XA- bzw. XB-Netzwerk und der IGS Lösung wurde, anstatt des dUT1 Wertes, der Parameter LoD verwendet. Der WRMS der Polparameter ist zur besseren Übersicht in μas bzw. für dUT1 in μs und LoD in $\frac{\mu\text{s}}{\text{Tag}}$ angegeben.

	xPol	yPol	dUT1/LoD
WRMS XA/XB	150.98	161.88	8.59
WRMS XA/IGS	112.67	172.60	47.76
WRMS XB/IGS	114.25	76.61	48.47

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Kapitel 7

Fazit und Ausblick

Mit den Daten der CONT17 Kampagne können die fünf Erdorientierungsparameter mit zwei unterschiedlichen Netzwerken bestimmt werden. Die Auswertung erfolgte mit der Software VieVS und zeigt mit den Standardparametern für den 12.12. einen sehr großen Ausreißer für das XB-Netzwerk. Dieser ist vor allem im hohen berechneten Bias zwischen den beiden Netzwerken ersichtlich. Der Nutationsparameter in y-Richtung zeigt eine Differenz zwischen beiden Netzwerken von $\sim 240 \mu\text{as}$ mit einer Standardabweichung von $\sim 780 \mu\text{as}$. Der Bias und der formale Fehler können jedoch durch das Ausschließen der Station HOBART26 vom 12.12. erheblich minimiert werden. Durch Halbieren des Schätzintervalles des feuchten Anteils der Troposphäre auf 30 Minuten kann der Bias zwischen den Netzwerken noch weiter verringert werden. Das Festsetzen der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte bringt nur eine minimale Verbesserung des formalen Fehlers der Berechnung mit sich.

In der globalen Lösung kann durch das gemeinsame Schätzen der EOP und das einheitliche geodätische Datum, der formale Fehler sowie der Bias zwischen den beiden Netzwerken noch besser minimiert werden. Die resultierenden mittleren Abweichungen liegen im Bereich von $\sim 125 \mu\text{as}(\pm)$ für dUT1 und die Polkoordinaten und bei $\sim 40 \mu\text{as}$ für die Nutationsparameter. Die Standardabweichungen der EOP Differenzen bewegen sich zwischen 60 und $100 \mu\text{as}$. Eine Berechnung der EOP in einer globalen Lösung bringt daher große Verbesserungen. In der globalen Lösung bringt das Setzen der Nutationsparameter auf die *a priori* Werte minimal andere Ergebnisse. Weiters kann mit einer Schätzung der EOP (bzw. ERP) in einem Intervall von 60 Minuten zwar eine höhere Auflösung erreicht werden, jedoch geht dies zu Lasten der Genauigkeit. Die formalen Fehler sowie die Biases werden im Gegensatz zum Schätzen in einem tageweisen Intervall deutlich größer.

Es kann generell gezeigt werden, dass Abweichungen der Zuschläge (Biases) zu den *a priori* EOP zwischen den beiden Netzwerken existieren. Diese können jedoch in der globalen Lösung klein gehalten werden. Außerdem lässt sich eine Abhängigkeit der Genauigkeit der EOP von der Geometrie der Verteilung der VLBI Stationen erkennen.

Ein Vergleich mit der Publikation von Böhm, S. et al. (2019) zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse. Im Vergleich zu Nilsson et al. (2019) unterscheiden sich die Zuschläge deutlicher. Einzig der Vergleich der ERP aus der VLBI berechnet, mit der IGS Lösung, zeigt die gleichen Erkenntnisse. Hier zeigt sich die Auswirkung der Geometrie der Stationsnetze auf die Sensitivität für die ERP. Das XB-Netzwerk ist deutlich sensitiver auf die Polparameter aufgrund der besseren Nord-Süd Ausdeh-

nung als das XA-Netzwerk. Dies lässt sich vor allem daran festmachen, dass die y-Polparameter des XB-Netzwerkes geringere Abweichungen zu jenen der IGS Lösung aufweisen als die der beiden VLBI Netzwerke untereinander. Für den Parameter LoD ist genau das Gegenteil der Fall, hier lässt sich eine bessere Übereinstimmung des XA-Netzwerkes mit den IGS Daten erkennen.

Die VGOS Beobachtungsdaten wurden in dieser Diplomarbeit nicht analysiert, da für die Antennen noch keine *a priori* Stationskoordinaten in ausreichender Qualität vorhanden waren. Für weitere Untersuchungen könnte man die berechneten Zuschläge zu den *a priori* EOP der beiden *Legacy* Netzwerke mit denen der VGOS Ergebnisse vergleichen. Dies gibt einen Vergleich mit einem weiteren unabhängigen VLBI Netzwerk. Eine genauere Untersuchung der Schätzung der ERP in einem stündlichen Intervall im Frequenzbereich könnte kurzperiodische Polbewegungen und dUT1 Schwankungen detektieren.

Tabellenverzeichnis

3.1	Stationen des <i>Legacy 1</i> Netzwerkes (Nothnagel, 2019)	26
3.2	Stationen des <i>Legacy 2</i> Netzwerkes (Nothnagel, 2019)	26
3.3	Erwartete Genauigkeit (formale Fehler) des CONT17 Netzwerkes aus Simulationen und tatsächliche Genauigkeit der CONT11 und CONT14 Netzwerke. Alle Werte sind in μs bzw. für dUT1 in μs angegeben (Behrend et al., 2017).	27
4.1	Datumsdefinierende Stationen des XA- (<i>Legacy 2</i>) und XB-Netzwerkes (<i>Legacy 1</i>)	36
5.1	Formaler Fehler der Berechnung des XA- und XB-Netzwerkes der <i>single session</i> Lösung mit den verschiedenen Auswertestrategien aus Abschnitt 5.3.1. Außerdem eine Übersicht des Offsets zwischen den berechneten Erdorientierungsparametern des XA- und XB-Netzwerkes und die Standardabweichung (SD) der EOP Differenzen. Alle Werte sind in μs bzw. für dUT1 in μs angegeben.	59
5.2	Formaler Fehler der Berechnung des XA- und XB-Netzwerkes der globalen Lösung mit den verschiedenen Auswertestrategien aus Abschnitt 5.3.2. Außerdem eine Übersicht des Offsets zwischen den berechneten Erdorientierungsparametern des XA- und XB-Netzwerkes und die Standardabweichung (SD) der EOP Differenzen. Alle Werte sind in μs bzw. für dUT1 in μs angegeben.	66
6.1	Für das XA- und XB-Netzwerk wurden die ERP alle 60 Minuten geschätzt. Zeilen 1-3 zeigen die Mittelwerte (<i>mean</i>) der Zuschläge zu den <i>a priori</i> ERP (dUT1, xPol, yPol) des XA- und XB-Netzwerkes einzeln sowie den Mittelwert der Differenzen der beiden Netzwerke. In den Zeilen 4-6 befinden sich die berechneten <i>root mean square</i> (RMS) von jeweils beiden Netzwerken sowie der Differenz der beiden Netzwerke. Alle Werte sind in μs bzw. für dUT1 in μs angegeben	76
6.2	Vergleich der gesamten (<i>a priori</i> +Zuschläge) ERP einer globalen Lösung der CONT17 Kampagne (XA- und XB-Netzwerk) mit denen der IGS Lösungen. Es ist sowohl der <i>weighted root mean square</i> (WRMS) der Differenz des XA- und XB-Netzwerkes als auch der WRMS der beiden Netzwerke einzeln mit den IGS Lösungen gegeben. Für den Bias des WRMS zwischen dem XA- bzw. XB-Netzwerk und der IGS Lösung wurde, anstatt des dUT1 Wertes, der Parameter LoD verwendet. Der WRMS der Polparameter ist zur besseren Übersicht in μs bzw. für dUT1 in μs und LoD in $\frac{\mu s}{Tag}$ angegeben.	77

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.



Abbildungsverzeichnis

2.1	Geometrisches Prinzip der VLBI Messung (Plank, 2013)	6
2.2	Flowchart einer VLBI Analyse (Böhm, J. und Schuh, 2013)	9
2.3	Beziehung der Frequenzbänder der Bewegung des CIP im himmelfesten (obere Hälfte) und im erdfesten (untere Hälfte) Referenzrahmen (Gross, 2007)	11
2.4	Geometrischer Signalweg G und gekrümmter Weg S aufgrund der Atmosphäre (Böhm, J., 2004)	14
2.5	<i>continuous piece-wise linear offset</i> (CPWLO) (Teke, 2011)	17
2.6	Struktur der VieVS Software mit allen Modulen (VieVs Wiki, 2019)	20
3.1	Kalender der CONT17 Kampagne (Nothnagel, 2019)	24
3.2	Cont17 <i>Legacy 1</i> (Blau) und <i>Legacy 2</i> (Rot) Netzwerk (Nothnagel, 2019)	25
4.1	Startseite des Programms VieVS	30
4.2	Beispiel eines <i>OPT</i> Files anhand der Session 17DEC01XA (Beobachtung des <i>Legacy 2</i> Netzwerkes am 01.12.2017), es werden hier zwei <i>clock breaks</i> gesetzt	31
4.3	Flowchart Diagramm des Moduls VIE_MOD (VieVs Wiki, 2019)	32
4.4	VieVS Fenster für die Einstellungen der Schätzung der Troposphäre, hier noch mit den Standardeinstellungen dargestellt	33
4.5	VieVS Fenster für die Einstellungen der Schätzung der Erdorientierungsparameter, hier noch mit den Standardeinstellungen gezeigt	34
4.6	VieVS Fenster für die Einstellungen der globalen Parameter	35
4.7	Ausgabedatei der Erdorientierungsparameter	38
5.1	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter aus den Lösungen mit Standardparametern (Abschnitt 4.1.1).	40
5.2	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station HOBART26 des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)	41
5.3	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station KASHIM11 des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)	44
5.4	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Ausschließen der Station ZELENCHK des XB-Netzwerkes vom 12.12.2017 (Abschnitt 4.1.2)	46

5.5	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit dem Schätzintervall des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abschnitt 4.1.3)	47
5.6	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die <i>a priori</i> Werte (Abschnitt 4.1.4)	48
5.7	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Berechnung der globalen Lösung von beiden Netzwerken (Abschnitt 4.2)	50
5.8	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit den Standardparametern (Abschnitt 4.1.1) und einer Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).	52
5.9	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter und für den 12.12. ohne die Station HOBART26 des XB-Netzwerkes. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).	54
5.10	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten und für den 12.12. ohne die Station HOBART26 des XB-Netzwerkes. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk (Abschnitt 4.3).	56
5.11	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter der <i>single session</i> Lösung, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die <i>a priori</i> Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich werden die Biases zwischen dem XA- und XB-Netzwerk angezeigt	57
5.12	Diagramme der Biases (Mittelwert und SD) der EOP mit den verschiedenen Auswertestrategien der <i>single session</i> Lösung	58
5.13	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter mit der Berechnung der globalen Lösung. Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3).	61
5.14	Vergleich der Biases von den beiden Netzwerken, einerseits als <i>single session</i> Lösung mit Schätzung des feuchten Anteils der Troposphäre alle 30 Minuten (Abb. 5.10), andererseits als globale Lösung (Abb. 5.13).	62
5.15	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter der globalen Lösung, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die <i>a priori</i> Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3). . .	63
5.16	Mit MATLAB visualisierte Erdorientierungsparameter in einem Schätzintervall von 60 Minuten, mit Festlegung der Nutationsparameter auf die <i>a priori</i> Werte (Abschnitt 4.1.4). Zusätzlich eine Darstellung der Biases zwischen der globalen Lösung des XA- und XB-Netzwerkes (Abschnitt 4.3).	65
5.17	Diagramme der Biases (Mittelwert und SD) der ERP mit den verschiedenen Auswertestrategien der globalen Lösung.	67

Literaturverzeichnis

- Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier und X. Collilieux (2016). „ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121.8, S. 6109–6131. ISSN: 21699356. DOI: 10.1002/2016JB013098.
- Artz, T. (2011). „Determination of Sub-daily Earth Rotation Parameters from VLBI Observations“. Diss. Rheinischen Friedrich–Wilhelms–Universität Bonn, S. 83. URL: <http://hss.ulb.uni-bonn.de/2011/2710/2710.pdf>.
- Behrend, D., C. Thomas, J. Gipson und E. Himwich (2017). „Organizing the Continuous VLBI Campaign 2017 (CONT17)“. In: *IVS 2018 General Meeting Proceedings* 2017.May 2014, S. 95–101. URL: http://ivscc.bkg.bund.de/publications/gm2018/21_behrend_etal.pdf.
- Bizouard, C. und D. Gambis (2009). „The Combined Solution C04 for Earth Orientation Parameters Consistent with International Terrestrial Reference Frame 2005“. In: *Geodetic Reference Frames. International Association of Geodesy Symposia*. Hrsg. von Drewes H. Bd. 134. Springer, Berlin, Heidelberg, S. 265–270. DOI: 10.1007/978-3-642-00860-3_{_}41. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-00860-3_41.
- Böhm, J. (2004). „Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI“. Diss. Technische Universität Wien. URL: <http://repositum.tuwien.ac.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:1-11175>.
- Böhm, J., S. Böhm, J. Boisits, A. Girdiuk, J. Gruber, A. Hellerschmied, H. Krásná, D. Landskron, M. Madzak, D. Mayer, J. McCallum, L. McCallum, M. Scharfner und K. Teke (Feb. 2018). „Vienna VLBI and Satellite Software (VieVS) for Geodesy and Astrometry“. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 130.986. DOI: 10.1088/1538-3873/aaa22b. URL: <https://doi.org/10.1088%2F1538-3873%2Faaa22b>.
- Böhm, J., S. Böhm, T. Nilsson, A. Pany, L. Plank, H. Spicakova, K. Teke und H. Schuh (2012). „The New Vienna VLBI Software VieVs“. In: *Geodesy for Planet Earth: Proceedings of the 2009 IAG Symposium, Buenos Aires, Argentina*

- 136.October 2015. Hrsg. von S. Kenyon, M. S. Pacino und U. Marti, S. 1007–1011. ISSN: 09399585. DOI: 10.1007/978-3-642-20338-1.
- Böhm, J. und H. Schuh (2004). „Vienna mapping functions in VLBI analyses“. In: *Geophysical Research Letters* 31.1, S. 2–5. ISSN: 00948276. DOI: 10.1029/2003GL018984.
- (2013). „Very Long Baseline Interferometry for Geodesy and Astrometry“. In: *Sciences of Geodesy - II: Innovations and Future Developments*. Hrsg. von Guochang Xu. Bd. II. Springer Berlin Heidelberg. Kap. 7, S. 339–376. ISBN: 9783642280009. DOI: 10.1007/978-3-642-28000-9.
- Böhm, J., B. Werl und H. Schuh (2006). „Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111.2, S. 1–9. ISSN: 21699356. DOI: 10.1029/2005JB003629. URL: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2005JB003629>.
- Böhm, S., M. Schartner, A. Gebauer, T. Klügel, U. Schreiber und T. Schüler (2019). „Earth rotation variations observed by VLBI and the Wettzell "G"ring laser during the CONT17 campaign“. In: *Advances in Geosciences* 50, S. 9–15. ISSN: 16807359. DOI: 10.5194/adgeo-50-9-2019.
- Campbell, J. (2000). „From Quasars to Benchmarks: VLBI Links Heaven and Earth.“ In: *IVS 2000 General Meeting Proceedings*. Hrsg. von N. R. Vandenberg und K. D. Baver, S. 19–34. DOI: NASA/CP-2000-209893. URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/campbell11.pdf>.
- Cannon, W. (1999). „Overview of VLBI“. In: *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 1999 Annual Report*. Hrsg. von N. Vandenberg und K. Baver, S. 13–17. URL: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20000011312.pdf>.
- Capitaine, N., B. Guinot und D. D. McCarthy (2000). „Definition of the celestial ephemeris origin and of UT1 in the international celestial reference frame“. In: *Astronomy and Astrophysics* 355.1, S. 398–405. ISSN: 00046361. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/0082/07b17b6e61d30d69a7f8476052d4931cad2e.pdf>.
- Capitaine, N. und P. T. Wallace (2008). „Concise CIO based precession-nutation formulations“. In: *Astronomy and Astrophysics* 478.1, S. 277–284. ISSN: 00046361. DOI: 10.1051/0004-6361:20078811.

- Chen, G. und T. A. Herring (1997). „Effects of atmospheric azimuthal asymmetry on the analysis of space geodetic data“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102.B9, S. 20489–20502. ISSN: 2169-9356. DOI: 10.1029/97jb01739.
- Davis, J. L., T. A. Herring, I. I. Shapiro, A. E. E. Rogers und G. Elgered (1985). „Geodesy by radio interferometry: Effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length“. In: *Radio Science* 20.6, S. 1593–1607. DOI: <https://doi.org/10.1029/RS020i006p01593>.
- Gross, R.S. (2007). „Earth Rotation Variations – Long Period“. In: *Treatise on Geophysics*. Bd. 3. Elsevier, S. 239–294. ISBN: 9780444527486. DOI: 10.1016/B978-044452748-6.00057-2. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444527486000572?via%3Dihub>.
- Haas, R., T. Hobiger, S. Kurihara und T. Hara (2017). „Ultra-rapid earth rotation determination with VLBI during CONT11 and CONT14“. In: *Journal of Geodesy* 91.7, S. 831–837. ISSN: 14321394. DOI: 10.1007/s00190-016-0974-x.
- Hellerschmied, A, R Haas, J Kodet, A Neidhardt und L Plank (2015). „Scheduling of VLBI observations to satellites with the Vienna VLBI Software (VieVS)“. In: S. 102–106. URL: https://viewswiki.geo.tuwien.ac.at/lib/execute/fetch.php?media=public:views_publications:Hellerschmied%202015%20-%20EVAG%20Azoren%20-%20paper.pdf.
- Herring, T. A. (1992). „Modeling Atmospheric Delays in the Analysis of Space Geodetic Data“. In: *Proceedings of Refraction of Transatmospheric signals in Geodesy*, eds. JC De Munck and TA Spoelstra, Netherlands Geodetic Commission Publications on Geodesy 36.4, S. 157–164.
- Herring, T. A., J. L. Davis und I. I. Shapiro (1990). „Geodesy by radio interferometry: The application of Kalman Filtering to the analysis of very long baseline interferometry data“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 95.B8, S. 12561–12581. DOI: 10.1029/JB095iB08p12561.
- Hobiger, T. (2006). „Very long baseline interferometry as a tool to probe the ionosphere“. Diss. Technische Universität Wien, ISSN 1811-8380. DOI: 10.1029/2005RS003297.
- Karbon, M., B. Soja, T. Nilsson, Z. Deng, R. Heinkelmann und H. Schuh (2017). „Earth orientation parameters from VLBI determined with a Kalman filter“. In: *Geodesy and Geodynamics* 8.6, S. 396–407. ISSN: 16749847. DOI: 10.1016/j.geog.2017.05.006. URL: <https://doi.org/10.1016/j.geog.2017.05.006>.

- Krásná, H. (2013). „Estimation of solid Earth tidal parameters and FCN with VLBI“. Diss. Technische Universität Wien, ISSN 1811-8380. URL: <http://repositum.tuwien.ac.at/obvutwoa/content/titleinfo/789696>.
- Landskron, D. und J. Böhm (2018a). „Refined discrete and empirical horizontal gradients in VLBI analysis“. In: *Journal of Geodesy* 92.12, S. 1387–1399. ISSN: 14321394. DOI: 10.1007/s00190-018-1127-1. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-018-1127-1>.
- (2018b). „VMF3/GPT3: refined discrete and empirical troposphere mapping functions“. In: *Journal of Geodesy* 92.4, S. 349–360. ISSN: 14321394. DOI: 10.1007/s00190-017-1066-2.
- (2019). „Improving dUT1 from VLBI intensive sessions with GRAD gradients and ray-traced delays“. In: *Advances in Space Research* 63.11, S. 3429–3435. ISSN: 18791948. DOI: 10.1016/j.asr.2019.03.041.
- MacMillan, D. S. (1995). „Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations“. In: *Geophysical Research Letters* 22.9, S. 1041–1044. ISSN: 19448007. DOI: 10.1029/95GL00887.
- (2017). „EOP and scale from continuous VLBI observing: CONT campaigns to future VGOS networks“. In: *Journal of Geodesy* 91.7, S. 819–829. ISSN: 1432-1394. DOI: 10.1007/s00190-017-1003-4. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1003-4>.
- Madzak, M., J. Böhm, S. Böhm, H. Krásná, T. Nilsson, L. Plank, C. Tierno Ros, H. Schuh, B. Soja, J. Sun und K. Teke (2014). „Vienna VLBI Software: Current Release and Plans for the Future“. In: *IVS 2014 General Meeting Proceedings*, S. 1–4. URL: https://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_220645.pdf.
- Malkin, Z. (2009). „On comparison of the Earth orientation parameters obtained from different VLBI networks and observing programs“. In: *Journal of Geodesy* 83.6, S. 547–556. ISSN: 09497714. DOI: 10.1007/s00190-008-0265-2.
- Mayer, D. (2019). „VLBI Celestial Reference Frames and Assessment with Gaia“. Diss. Technische Universität Wien, S. 138. URL: <https://repositum.tuwien.ac.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:3-4614>.
- Niell, A. E. (1996). „Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths“. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 101.B2, S. 3227–3246. DOI: 10.1029/95jb03048.
- Niell, A., A. Coster, F. S. Solheim, V. Mendes, P. C. Toor, R. B. Langley und C. A. Upham (2001). „Comparison of Measurements of Atmospheric Wet Delay by Radiosonde, Water Vapor Radiometer, GPS, and VLBI“. In: *Journal*

- of Atmospheric and Oceanic Technology* 18, S. 830–850. DOI: 10.1175/1520-0426(2001)018<0830:COMOAW>2.0.CO;2.
- Nilsson, T., K. Balidakis, R. Heinkelmann und H. Schuh (2019). „Earth Orientation Parameters from the CONT17 Campaign“. In: *Geophysica* 54, S. 19–25. URL: http://www.geophysica.fi/pdf/geophysica_2019_54_nilsson.pdf.
- Nilsson, T., J. Böhm und H. Schuh (Jan. 2010). „Sub-Diurnal Earth Rotation Variations Observed by VLBI“. In: *Artificial Satellites* 45.2, S. 49–55. ISSN: 2083-6104. DOI: 10.2478/v10018-010-0005-8. URL: <http://content.sciendo.com/view/journals/arsa/45/2/article-p49.xml>.
- Nilsson, T., R. Heinkelmann, M. Karbon, V. Raposo-Pulido, B. Soja und H. Schuh (2014). „Earth orientation parameters estimated from VLBI during the CONT11 campaign“. In: *Journal of Geodesy* 88.5, S. 491–502. ISSN: 14321394. DOI: 10.1007/s00190-014-0700-5. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-014-0700-5>.
- Nothnagel, A. (2019). *Continuous VLBI Campaign 2017*. zuletzt besucht am 2020-03-07. URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/program/cont17/>.
- Petit, G. und B. Luzum (2010). „IERS Conventions (2010)“. In: *IERS Technical Note* 36, S. 1–179. URL: <https://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/tn36.html>.
- Petrachenko, B., A. Niell, D. Behrend, B. Corey, J. Böhm, P. Charlot, A. Collioud, J. Gipson, R. Haas, T. Hobiger, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, T. Nilsson, A. Pany, G. Tuccari, A. Whitney und J. Wresnik (2009). „Design Aspects of the VLBI2010 System. Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee“. In: *Progress Report of the IVS VLBI2010 Committee*, S. 1. URL: <https://ivscc.gsfc.nasa.gov/technology/vgos-docs/TM-2009-214180.pdf>.
- Petrachenko, B., A. Niell, B. E. Corey, D. Behrend, H. Schuh und J. Wresnik (2012). „VLBI2010: Next generation VLBI system for geodesy and astrometry“. In: *International Association of Geodesy Symposia* 136, S. 999–1005.
- Petrov, L. und J.-P. Boy (2004). „Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations“. In: *Journal of Geophysical Research* 109.B3, S. 1–14. ISSN: 0148-0227. DOI: 10.1029/2003jb002500.
- Plank, L. (2013). „VLBI satellite tracking for the realization of frame ties“. Diss. Technische universität Wien, S. 158. URL: <http://repositum.tuwien.ac.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:3-415>.

- Plank, L., J. Böhm und H. Schuh (2014). „Precise station positions from VLBI observations to satellites: A simulation study“. In: *Journal of Geodesy* 88.7, S. 659–673. ISSN: 14321394. DOI: 10.1007/s00190-014-0712-1.
- Saastamoinen, J. (1972). „Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio Ranging Satellites“. In: *The Use of Artificial Satellites for Geodesy*. Hrsg. von S.W. Henriksen, A. Mancini und B.H. Chovitz. Bd. 15. 4. American Geophysical Union (AGU), S. 247–251. DOI: 10.1029/GM015p0247. URL: <http://doi.wiley.com/10.1029/GM015p0247>.
- Schartner, M. und J. Böhm (2019). „VieSched++: A new VLBI scheduling software for geodesy and astrometry“. In: *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 131.1002, S. 84501. ISSN: 00046280. DOI: 10.1088/1538-3873/ab1820. URL: <http://dx.doi.org/10.1088/1538-3873/ab1820>.
- Scherneck, H. -G (1991). „A parametrized solid earth tide model and ocean tide loading effects for global geodetic baseline measurements“. In: *Geophysical Journal International* 106.3, S. 677–694. ISSN: 1365246X. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1991.tb06339.x.
- Schlüter, W. und D. Behrend (2007). „The international VLBI service for geodesy and astrometry (IVS): Current capabilities and future prospects“. In: *Journal of Geodesy* 81.6-8, S. 379–387. ISSN: 09497714. DOI: 10.1007/s00190-006-0131-z. URL: <https://doi.org/10.1007/s00190-006-0131-z>.
- Schmidt, M., D. Angermann, M. Bloßfeld, F. Göttl, B. Richter und M. Seitz (2010). „Erdrotation und geophysikalische Anregungsmechanismen“. In: *ZFV - Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 135.2, S. 105–111. ISSN: 16188950. URL: https://www.researchgate.net/publication/260183265_Erdrotation_und_geophysikalische_Anregungsmechanismen.
- Schuh, H. (1999). „The rotation of the earth observed by VLBI“. In: *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 34.4, S. 421–432. ISSN: 12178977. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF03325585>.
- (2000). „Geodetic Analysis Overview“. In: *IVS 2000 General Meeting Proceedings*, S. 219–229. URL: <https://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/gm2000/schuh1.pdf>.
- Schuh, H. und D. Behrend (2011). „VLBI : A Fascinating Technique for Geodesy and Astrometry“. In: *Journal of Geodynamics* 13.December 2010, S. 14181. DOI: 10.1016/j.jog.2012.07.007. URL: http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/JGeodyn_SchuhBehrend2012_submitted.pdf.

- Sovers, O.J., J. L Fanselow und C. S Jacobs (1998). „Astrometry and geodesy with radio interferometry: experiments, models, results“. In: *Rev. Mod. Phys.* 70.4, S. 1393–1454. DOI: 10.1103/RevModPhys.70.1393. URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.70.1393>.
- Teke, K. (2011). „Sub-daily parameter estimation in VLBI data analysis“. Diss. Technische Universität Wien. URL: <http://repositum.tuwien.ac.at/urn:nbn:at:at-ubtuw:3-146>.
- Teke, K., E. T. Kayıkçı, J. Böhm und H. Schuh (2012). „Modelling Very Long Baseline Interferometry (VLBI) observations“. In: *Journal of Geodesy and Geoinformation* 1.1, S. 17–26. ISSN: 21471339. DOI: 10.9733/jgg.120512.1.
- Titov, O. und H. Schuh (2000). „Short periods in Earth rotation seen in VLBI data analysed by the least-squares collocation method“. In: *IERS Technical Note*. URL: https://www.iers.org/SharedDocs/Publikationen/EN/IERS/Publications/tn/TechnNote28/tn28_33.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- VieVs Wiki (2019). *User Guide*. zuletzt besucht am 2019-09-09. URL: https://viewswiki.geo.tuwien.ac.at/doku.php?id=public:views_manual:user_guide.