

Die approbierte Originalversion dieser Dissertation ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (<http://www.ub.tuwien.ac.at>).

The approved original version of this thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (<http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/>).



DISSERTATION

Simulationen für die neue Generation von VLBI-Systemen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Doktors
der technischen Wissenschaften unter der Leitung von

Univ. Prof. Dr. Ing. Harald Schuh
und
Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Böhm

E 128, Institut für Geodäsie und Geophysik

eingereicht an der
Technischen Universität Wien
Fakultät für Mathematik und Geoinformation

von
Dipl.-Ing. Jörg Wresnik
E086 / 9826254
Moosweg 68
A-9535 Schiefing am See

BEGUTACHTER

Univ. Prof. Dr.-Ing. Harald Schuh
Institut für Geodäsie und Geophysik
der Technischen Universität Wien
Gußhausstraße 27-29, 1040 Wien, Österreich

Priv.-Doz. Dr.-Ing. Axel Nothnagel
Institut für Geodäsie und Geoinformation
der Universität Bonn
Nußallee 17, 53115 Bonn, Deutschland

Danksagung - Acknowledgement

I would like to thank the Austrian Science Fund (FWF) for supporting this work within the project VLBI2010 (P18404-N10), also all members of the VLBI2010 committee (V2C) for a very constructive discussion in all weekly tele conferences. In special I am thankful to Bill Petrachenko for chairing the V2C, and for all his personal interest in this project.

Besonders möchte ich mich bei meinen Betreuern Dr.-Ing. Harald Schuh und Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Böhm für die fachliche Unterstützung, sowie bei meiner Kollegin Dipl.-Ing. Andrea Pany für den ständigen Erfahrungsaustausch bedanken.
Vor allem aber möchte ich meiner Familie und ganz besonders meiner Freundin Manu ein großes Dankeschön sagen, weil sie mir immer wieder neuen Mut und Kraft gegeben haben.
Dankeschön.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Kurzfassung | 6 |
| Abstract | 7 |
| 1 Einleitung..... | 8 |
| 2 Very Long Baseline Interferometry (VLBI)..... | 10 |
| 2.1 Messprinzip der VLBI..... | 10 |
| 2.2 Technische Umsetzung | 15 |
| 2.2.1 Die Beobachtungsstation | 15 |
| 2.2.2 Der Korrelator..... | 17 |
| 2.2.3 Die Beobachtungen | 18 |
| 2.2.4 Geodätische Auswertung | 19 |
| 2.3 Systematische Fehlerquellen | 20 |
| 2.3.1 Instrumentelle Fehlereinflüsse | 20 |
| 2.3.2 Fehlereinflüsse durch das Medium..... | 20 |
| 2.4 Messung von zusätzlichen Parametern an der Station | 21 |
| 3 VLBI2010..... | 22 |
| 3.1 Das Konzept für VLBI2010..... | 22 |
| 3.2 Reduktion des Messfehlers pro Beobachtung..... | 23 |
| 3.3 Korrekturen aufgrund von Quellenstrukturen..... | 25 |
| 4 Monte-Carlo-Simulation..... | 27 |
| 4.1 Der Monte-Carlo-Simulator für VLBI2010..... | 29 |
| 4.1.1 Modellierung des Messfehlers mittels weißen Rauschens..... | 32 |
| 4.1.2 Simulation der VLBI-Stationsuhren | 33 |
| 4.1.3 Simulation der Atmosphäre mit einem <i>random walk</i> Prozess | 36 |
| 4.1.4 Simulation der Atmosphäre durch ein Turbulenzmodell..... | 37 |
| 4.2 Beobachtungsplanung..... | 42 |
| 4.2.1 Beobachtungsplanung mit dem Softwarepaket SKED | 42 |
| 4.2.2 Beobachtungsplanung mit gleichmäßiger Quellenverteilung, <i>uniform sky</i> | 45 |
| 4.3 VLBI-Auswertung mit dem Softwarepaket OCCAM 6.2 SIM..... | 47 |
| 4.3.1 Gauß-Markov Least Squares Method (LSM) | 48 |
| 4.3.2 Kalman Filter | 49 |
| 4.3.3 Vergleich Gauß-Markov Modell und Kalman Filter..... | 51 |
| 4.4 Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation..... | 53 |
| 5 Einflussgrößen des Monte-Carlo-Simulators | 56 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 5.1 | Einfluss der VLBI-Stationsuhren, des Beobachtungsfehlers und des simulierten ZWD..... | 56 |
| 5.1.1 | Einfluss des Beobachtungsplans auf die VLBI-Auswertung | 57 |
| 5.1.2 | Einfluss des weißen Rauschens | 59 |
| 5.1.3 | Einfluss der VLBI-Stationsuhren | 61 |
| 5.1.4 | Einfluss der Atmosphäre | 62 |
| 5.2 | MCS mit Hilfe des Turbulenzmodells | 64 |
| 5.3 | Einfluss des Kalman Filters | 68 |
| 5.4 | Einfluss der Parameter Cn, H und Windgeschwindigkeit auf die VLBI-Analyse..... | 73 |
| 5.4.1 | Änderung des Cn-Wertes | 74 |
| 5.4.2 | Änderung der Höhe der feuchten Atmosphäre | 77 |
| 5.4.3 | Änderung der Windgeschwindigkeit | 81 |
| 5.5 | Einfluss der Uhrenparameter und des weißen Rauschens auf den MCS bei Verwendung des Turbulenzmodells | 87 |
| 6 | Monte-Carlo-Simulationen für VLBI2010-Spezifikationen..... | 95 |
| 6.1 | Verschiedene Strategien zur Erstellung von VLBI2010-Beobachtungsplänen mit SKED | 95 |
| 6.2 | Ermittlung der optimalen Antennendrehgeschwindigkeiten | 98 |
| 6.3 | VLBI2010-Testnetzwerke | 109 |
| 7 | Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick..... | 112 |
| | Literaturverzeichnis..... | 115 |
| | Abkürzungsverzeichnis..... | 121 |
| | Anhang..... | 123 |
| | Lebenslauf | 129 |

Kurzfassung

Die geodätische VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) ist das wichtigste Verfahren zur Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde, der Parameter für Nutation und Präzession und des himmelfesten Referenzrahmens (*Celestial Reference Frame*, CRF), der durch die Positionen von extragalaktischen Radioquellen realisiert wird. Aufgrund der immer höheren Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und zeitliche Auflösung der geodätischen Parameter muss der *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS) das Design seiner Netze und seine Beobachtungsstrategien überdenken. Dazu wurde im Oktober 2003 vom IVS die *Working Group 3* (WG3) „VLBI2010“ ins Leben gerufen. Als Ergebnis des Abschlussberichts der WG3 (Niell et al., 2005) wurde das VLBI2010-Komitee (V2C) als permanente Institution des IVS eingerichtet, um die Entwicklung der Hardware, Software und der Beobachtungsstrategien für die nächste Generation der VLBI-Beobachtungssysteme voranzutreiben.

In der vorliegenden Arbeit werden, wie vom IVS angeregt, gründliche, systematische Simulationen durchgeführt. Herzstück der Simulationen ist ein Monte-Carlo-Simulator (MCS), der die drei größten stochastischen Fehleranteile des VLBI-Systems berücksichtigt. Dabei wird die troposphärische Laufzeitverzögerung mit einem Turbulenzmodell simuliert, die VLBI-Stationsuhren mittels *random walk plus integrated random walk* und der Anteil der Ungenauigkeit der Beobachtungseinrichtung wird durch weißes Rauschen simuliert. Der MCS wurde direkt in das VLBI-Auswerteprogramm OCCAM (Titov et al., 2004) integriert und liefert somit den verkürzten Beobachtungsvektor *o - c* (*observed minus computed*). Eine Vielzahl an verschiedenen Beobachtungsszenarien wurden mit dem Programm SKED (Vandenberg, 1999), und mit dem *uniform sky* Algorithmus erstellt. Die Ergebnisse (formale Fehler der Parameter) aus den mit der modifizierten Version der Auswertesoftware, OCCAM 6.2 SIM, ausgewerteten VLBI *sessions* zeigen, dass der feuchte Anteil der Atmosphäre in der VLBI-Auswertung nicht ausreichend genau a priori modelliert bzw. geschätzt werden kann und somit der limitierende Faktor der VLBI ist. Für die VLBI-Stationsuhr gilt, dass die *Allan Standard Deviation* (ASD) von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min für die Zeitübertragung auf das VLBI-System ausreichend ist. Eine Antennendrehgeschwindigkeit von 12 °/s in Azimut und 3.5 °/s in Elevation ist notwendig, um sehr dichte Beobachtungspläne erstellen und so die geforderte Genauigkeit von 1 mm/Jahr für das VLBI2010-System erreichen zu können.

Abstract

Geodetic Very Long Baseline Interferometry is the unique technique to determine the earth angular velocity, the parameter of nutation and precession and the Celestial Reference Frame (CRF), given by extragalactic radio sources. Due to the rising level of accuracy, reliability, and time resolution of geodetic parameters, the International VLBI Service for Geodesy and Astrometry (IVS) is forced to reconsider the design of their networks and observing strategies. Thus in October 2003 the IVS established the Working Group 3 (WG3) „VLBI2010“. As a result of the final report of WG3 (Niell et al., 2005) the VLBI2010 committee (V2C) was established as a permanent institution of the IVS to push on the investigations on hardware, software and on observing strategies for the next generation VLBI System.

For the investigations presented here, systematic simulations are carried out, like promoted from the IVS. Main part of the simulations is a so called Monte Carlo Simulator (MCS), which is based on the three main stochastic error sources of the VLBI System. The troposphere delay is simulated with a turbulence model, the VLBI Station clocks are simulated by a random walk plus integrated random walk and the observation error is simulated by white noise. The MCS was directly implemented to the VLBI analyzing software OCCAM (Titov et al., 2004) and provides the vector $o - c$ (observed minus computed). Various different schedules have been produced with the software package SKED (Vandenberg, 1999) or with the uniform sky approach. The results (formal errors of the parameters) out of the modified analyzing software, OCCAM 6.2 SIM, show that a priori modeling respectively the estimation of the wet part of the atmosphere is not precise enough. Thus the limiting factor for the VLBI-System is the wet delay. Concerning the VLBI clocks, the studies show that an Allan Standard Deviation (ASD) of $1 \cdot 10^{-14} @ 50$ is sufficient for the VLBI2010 System. For very dense schedules a slew speed of $12 \text{ }^\circ/\text{s}$ in azimuth and $3.5 \text{ }^\circ/\text{s}$ in elevation is required, also to reach the goal of an accuracy of 1 mm/year on a global scale for the VLBI2010 System.

1 Einleitung

Die geodätische VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) ist das wichtigste Verfahren zur Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde, der Parameter für Nutation und Präzession und des himmelfesten Referenzrahmens (*Celestial Reference Frame*, CRF), der durch die Positionen von extragalaktischen Radioquellen realisiert wird. Aufgrund der immer höheren Anforderungen an Genauigkeit, Zuverlässigkeit und die zeitliche Auflösung der geodätischen Parameter muss der *International VLBI Service for Geodesy and Astrometry* (IVS) das Design seiner Netze und seine Beobachtungsstrategien überdenken. Dazu wurde im Oktober 2003 vom IVS die *Working Group 3* (WG3) „VLBI2010“ ins Leben gerufen. Als Ergebnis des Abschlussberichts der WG3 (Niell et al., 2005) wurde das VLBI2010-Komitee (V2C) als permanente Institution des IVS eingerichtet, um die Entwicklung der Hardware, Software und der Beobachtungsstrategien für die nächste Generation der VLBI-Beobachtungssysteme voranzutreiben. Ein sehr klar definiertes Ziel des V2C ist es, durch gründliche und systematische Simulationen des gesamten VLBI-Systems, Spezifikationen für das zukünftige VLBI2010-System zu definieren. Der Abschlussbericht der WG3 gibt ein grobes Konzept für das VLBI2010-System vor. Es sind definitive Vorstellungen über die Größe von einer VLBI2010-Antenne, der beobachteten Bandbreite oder auch der Größe eines VLBI2010-Stationsnetzwerks angeführt. Ein Simulator sollte nun die Ideen des WG3-Berichtes objektiv prüfen, um definitive Empfehlungen und Standards für das zukünftige VLBI-System bekanntgeben zu können. Die Ansprüche, denen ein Simulator genügen soll, sind neben der so realistisch wie möglichen Darstellung des VLBI-Systems vor allem hohe Flexibilität und eine sehr kurze Rechenzeit. Dies soll es ermöglichen, ohne großen Aufwand und in einer vertretbaren Rechenzeit verschiedenste Szenarien und Parameter testen und evaluieren zu können.

Der Abschlussbericht der WG3 unterstreicht die Notwendigkeit, von den Erkenntnissen der Radioastronomie Gebrauch zu machen. Deshalb wird für die VLBI2010-Radioteleskope eine Größe von 12 m vorgeschlagen, wie sie in der Radioastronomie in großen zusammengesetzten Netzwerken eingesetzt wird. Als Beispiel dafür kann das *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA), Chile, genannt werden, welches aus 64 einzelnen 12 m Radioteleskopen besteht, die je nach Bedarf auf einer Fläche von zehn Kilometer Durchmesser verteilt werden können. Alle Antennen können gleichzeitig ein Objekt anvisieren und so astronomische Bilder von außergewöhnlicher Schärfe gewonnen werden. Die Forschungsarbeiten und Entwicklungen von *low-cost high-performance* Radioteleskopen sollte es dem VLBI2010-System ermöglichen, das bestehende VLBI-Netzwerk wirtschaftlich zu vergrößern. Tägliche VLBI-Beobachtungen in einem größeren Netzwerk würden es erlauben, mehrere unterschiedlich ausgelegte *sessions* zeitgleich zu realisieren. Beispielsweise könnten spezielle CRF *sessions* und Erdorientierungsparameter (EOP) *sessions* zeitgleich beobachtet werden. Derzeit verfügt der IVS über 28 VLBI-Stationen. Der Großteil der VLBI-Antennen sind in Nord Amerika, Europa und Japan gelegen. Es gibt nur sehr wenige VLBI-Antennen, die südlich des Äquators positioniert sind. Neue VLBI2010-Antennen sollten diese inhomogene Stationsverteilung so gut wie möglich homogenisieren und ein operatives Netzwerk von insgesamt 40 Stationen bilden. Dies liefert eine ganz neue Herausforderung für die Planung und Optimierung von VLBI2010-Beobachtungsplänen. Automationsunterstützte Beobachtungspläne werden derzeit mit dem Softwarepaket SKED (Vandenberg, 1999) erzeugt, welches auf die zukünftigen Anforderungen adaptiert und getestet werden muss. Auch neue Ansätze für die Optimierung von Beobachtungsplänen lassen sich mit Hilfe eines Monte-Carlo-Simulators

leicht testen. Kapitel 2 beschäftigt sich mit den derzeitigen VLBI-Standards, wohingegen Kapitel 3 die VLBI2010-Systemeigenschaften zusammenfasst.

Kapitel 4 skizziert den prinzipiellen Aufbau des für die VLBI2010-Simulationen verwendeten Monte-Carlo-Simulators. Dieser basiert auf der Simulation des verkürzten Beobachtungsvektors $o-c$, wobei die größten stochastischen Fehleranteile des VLBI-Systems berücksichtigt werden. Eine der größten stochastischen Fehlerquellen ist die troposphärische Laufzeitverzögerung, welche mit einem *random walk* angenähert werden kann. Dieser Vorgang wird aber nach den ersten Ergebnissen zur Abschätzung der größten Fehlereinflüsse durch ein wesentlich realistischeres Turbulenzmodell ersetzt. Die zweite große Fehlerquelle sind die VLBI-Stationsuhren, welche mittels *random walk* und *integrated random walk* dargestellt werden können. Ein weiterer Anteil wird der Ungenauigkeit des gesamten Beobachtungssystems zugeschrieben, der mittels weißen Rauschens simuliert wird.

Der Monte-Carlo-Simulator ist direkt in das VLBI-Auswerteprogramm OCCAM integriert und liefert so direkt den verkürzten Beobachtungsvektor $o-c$. Kapitel 5 beschreibt die Einflussgrößen des Monte-Carlo-Simulators. Der Einfluss verschiedener *Allan Standard Deviations* (ASD) für VLBI-Stationsuhren, *Power Spectral Densities* (PSD) des feuchten Anteils der Atmosphäre und verschiedenen weißen Rauschens auf die VLBI-Auswertung, werden mit dem Monte-Carlo-Simulator getestet. Auch die einzelnen Parameter des in Kapitel 4 beschriebenen Turbulenzmodells werden im Kapitel 5 genauer untersucht. Für den Großteil der Simulationen wird das VLBI2010-Testnetzwerk mit 16 VLBI-Stationen verwendet.

Mit verschiedensten Beobachtungsplänen werden gezielt Antworten auf Fragen gefunden (Kapitel 6), wie z.B. die optimale Schwenkgeschwindigkeit der VLBI-Antennen, eine optimale Stationsnetzdesign (sowohl Anzahl als auch globale Verteilung der Stationen), einheitliche Quellenverteilung der beobachteten Radioquellen an der Beobachtungsstation oder Bestimmung der Erdrotationsparameter. Die Ergebnisse (Wiederholbarkeiten der Parameter) aus den mit der modifizierten Version der Auswertesoftware OCCAM ausgewerteten VLBI *sessions* werden anschaulich dargestellt und dienen als Grundlage zur Entwicklung der neuen Generation von VLBI-Systemen. Die Erkenntnisse der Arbeit werden regelmäßig an das V2C geleitet. Hier werden Änderungen und Verbesserungen des Monte-Carlo-Simulators diskutiert und die Vorgaben für weitere Untersuchungen definiert.

2 Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

Die Radiointerferometrie auf langen Basislinien (*Very Long Baseline Interferometry*, VLBI) findet seit Anfang der siebziger Jahre bei interkontinentalen Experimenten Anwendung. Bald wurden nicht nur der astronomische und astrophysikalische Nutzen, sondern auch die Anwendungsmöglichkeiten für Geodäsie und Geophysik erkannt. Es stellte sich heraus, dass die VLBI als hochgenaues Messverfahren für diverse geowissenschaftliche Aufgabenstellungen herangezogen werden kann (Shapiro und Knight, 1970). Für Geodäsie und Astrometrie sind dabei vor allem die Basislinienvektoren zwischen den Referenzpunkten der Antennen und die Positionen der Radioquellen von Interesse. Im Gegensatz zum astronomischen Anwendungsbereich, der seine Ergebnisse hauptsächlich aus Amplituden- und Phaseninformation ermittelt, beruhen die Modelle der geodätischen Anwender auf den Gruppenlaufzeitdifferenzen τ . In den folgenden Unterkapiteln werden das Messprinzip und seine technischen Umsetzungen (Campbell et al., 1992, und Whitney, 2000), sowie die Auswertung und die systematischen Fehlerquellen skizziert (Campbell, 2000, Schuh, 1987, Hobiger, 2002).

2.1 Messprinzip der VLBI

Die geodätische VLBI basiert auf der synchronen Beobachtung extragalaktischer Radioquellen (z.B. Quasare) mit zwei oder mehreren Radioantennen (Abb. 2-1). Die Stationen müssen über ein Empfangssystem verfügen, welches es ermöglicht, die empfangene Strahlung herunterzumischen, zu digitalisieren, zu formatieren und zu registrieren. Zur Registrierung der Daten dienen Magnetbänder (Mark IV) oder Festplatten (Mark V, Abb. 2-4) als Medium. Zusätzlich muss auf jeder Station ein genaues Frequenznormal (Atomuhr) vorhanden sein, das Zeitsignale an das Aufzeichnungsgerät sendet und damit erst eine spätere Auswertung am Korrelator ermöglicht. Unter der Annahme, dass die Empfangs- und Aufzeichnungssysteme zweier Stationen auf der selben Frequenz und Bandbreite beobachten, kein Rauschen vorhanden ist und äußere Einflüsse eliminiert sind, wären die aufgezeichneten Signale an allen Stationen bis auf eine zeitliche Versetzung völlig identisch. Dieser Zeitunterschied, die Laufzeitverzögerung τ , kann durch die Maximierung der Kreuzkorrelationsfunktion zwischen den Signalen je zweier Stationen bestimmt werden (Schuh, 1987).

$$\rho_{ij} = \frac{\langle V_i V_j^* \rangle}{\sqrt{\langle V_i V_i^* \rangle \langle V_j V_j^* \rangle}} \quad (2.1-1)$$

$V_i V_j$ *Spannungsfluktuation an den Antennen i und j*

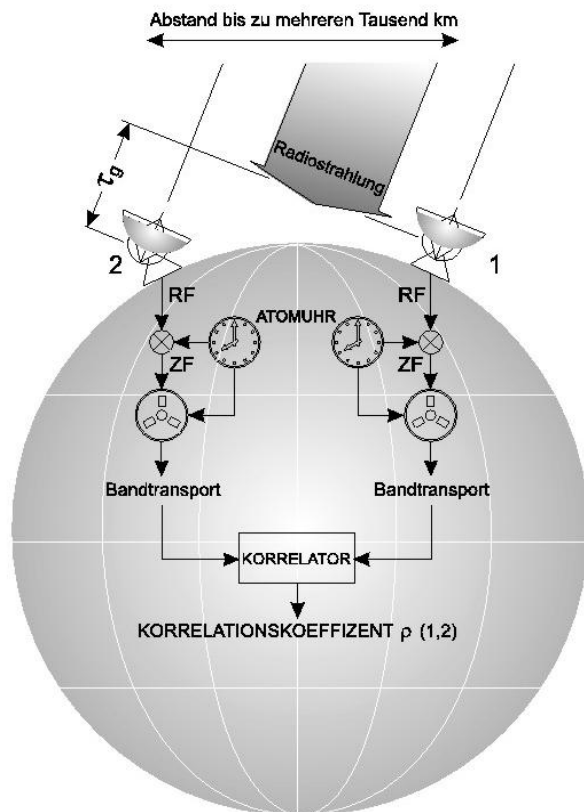


Abb. 2-1: Prinzip der Radiointerferometrie auf langen Basislinien (<http://www.mpifr-bonn.mpg.de/public/angela/main.html>). Dieses Bild zeigt Beobachtungen mit dem Mark IV VLBI-System, das Magnetbänder als Datenaufzeichnungsmedium verwendet. Modernere Systeme verwenden Festplatten als Aufzeichnungsmedium (Mark V, Abb. 2-4), oder die Daten werden direkt über optische Faserkabel an den Korrelator gesendet (e-VLBI).

Durch die Erddrehung ist allerdings der Kreuzkorrelationskoeffizient ρ_{ij} von der Zeit abhängig, wodurch er mit der so genannten Streifenfrequenz f oszilliert. Die Schwingung ist wegen der Winkelausdehnung der Quelle, durch Phasenverzerrungen in der Atmosphäre, durch die Atomuhren sowie durch den Einfluss der Bandbreite in Amplitude und Phase moduliert. Analysiert man das Interferenzsignal, erhält man als Bestimmungsstücke die folgenden Parameter (Tab. 2.1-1).

Tab. 2.1-1: Parameter der Analyse des Interferenzsignals.

| |
|----------------------|
| Amplitude A |
| Streifenphase Φ |
| Streifenfrequenz f |
| Laufzeit τ |

Die Laufzeit τ entspricht der Lage des Korrelationsmaximums auf der τ -Achse. Die Amplitude und die Phase der Kohärenzfunktion sind von der Intensitätsverteilung der Quelle abhängig und werden daher für deren Bildrekonstruktion verwendet. Die geodätischen Informationen (Quellenvektor, Basislinienvektor, Erdrotationsparameter) werden aus der Laufzeit τ und der Streifenfrequenz f gewonnen. Bei der Laufzeit ist noch zwischen der Phasenlaufzeit (*phase delay*) $\tau_\phi(t)$ und der Gruppenlaufzeit $\tau(t)$ als der Ableitung der Streifenphase $\Phi(\omega, t)$ nach der Frequenz ω zu unterscheiden.

$$\tau_{\phi}(t) = \frac{\Phi(\omega, t)}{\omega} \quad (2.1-2)$$

ω Beobachtungsfrequenz

$$\tau(t) = \frac{\partial \Phi(\omega, t)}{\partial \omega} . \quad (2.1-3)$$

Geodätische Lösungen mit der Phasenlaufzeit sind bisher aufgrund der vorhandenen Mehrdeutigkeiten und des Verlustes des Phasenbezugs zwischen aufeinanderfolgenden Beobachtungen nur auf sehr kurzen Basislinien (einige Kilometer) möglich (Herring, 1983). Die Streifenfrequenz ergibt sich aus der partiellen Ableitung der Streifenphase nach der Zeit:

$$f(t) = \frac{\partial \Phi(\omega, t)}{\partial t} = \omega \cdot \dot{\tau}(t) . \quad (2.1-4)$$

Die Laufzeitänderung in Abhängigkeit der Zeit (*delay rate*) ist dabei wie folgt definiert:

$$\dot{\tau}(t) = \frac{f(t)}{\omega} . \quad (2.1-5)$$

Der Parameter $\dot{\tau}$ war in der Frühzeit der geodätischen VLBI neben der Gruppenlaufzeit für geodätische Lösungen von Bedeutung gewesen, wird aber heutzutage kaum noch verwendet.

Ein entscheidendes Kriterium für eine erfolgreiche VLBI-Messung ist ein ausreichendes Signal-zu-Rauschverhältnis (*Signal to Noise Ratio*, SNR) im Interferenzsignal (Campbell et al., 1992). Die Flussdichte ist durch die Stärke der Quelle und die Empfindlichkeit der Antennen vorgegeben. Aus ihr kann man das SNR wie folgt berechnen:

$$SNR = \eta \frac{F_d}{2k} \cdot \sqrt{\frac{A_1 \cdot A_2}{T_{S1} \cdot T_{S2}}} \cdot \sqrt{2BT} . \quad (2.1-6)$$

| | |
|------------------|--|
| η | Verlustfaktor wegen Digitalisierung und Filterung, |
| F_d | Flussdichte der Radioquelle (in Jansky), |
| k | Boltzmannkonstante ($1.38 \cdot 10^{-23}$ Ws/K), |
| A_1, A_2 | effektive Antennenflächen, |
| T_{S1}, T_{S2} | Rauschtemperaturen der Empfangssysteme, |
| B | Bandbreite, |
| T | kohärente Integrationszeit. |

Der Phasenfehler durch dieses Rauschen ergibt sich damit zu:

$$\sigma_{\phi} = \frac{1}{SNR} \cdot \quad (2.1-7)$$

Wie jedoch schon angesprochen, ist aufgrund der Phasenmehrdeutigkeit eine Verwendung der Phaseninformation für Messungen auf langen Basislinien bisher nicht erfolgreich. Da das SNR mit wachsender Bandbreite zunimmt, versucht man, diese so weit wie möglich zu erhöhen.

Eine Wellengruppe kann auch als Überlagerung von einzelnen Fourierkomponenten des Breitbandsignalstroms verstanden werden. Die dafür relevante Gruppenlaufzeit verursacht für die Astrometrie und Geodäsie keine Probleme, da sie mehrdeutigkeitsfrei ist. Die Strahlung einer Radioquelle kann normalerweise als weißes Rauschen aufgefasst werden (Kontinuumsquelle). Bildet man nun die Autokorrelationsfunktion eines bandbegrenzten Rauschens, so weist diese bei $\tau = 0$ ihr Maximum auf und fällt bei

$$\tau = \frac{1}{B} \quad (2.1-8)$$

auf Null ab (Wohlleben und Mattes, 1973). Bringt man die an zwei getrennten Antennen gemessenen Signale durch Korrelation zur Interferenz, so erhält man das gleiche Muster wie wenn die durch die Geometrie bedingte unterschiedliche Laufzeit zu den beiden Antennen (τ_{geom}) zu Null gemacht wird. Das Korrelationsmaximum liegt daher bei $\tau = \tau_{geom}$ und besitzt eine Halbwertsbreite von $1/B$ (Campbell et al., 1992). Durch die Anwendung geeigneter Algorithmen wird das Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion gesucht und der zugehörige Wert auf der τ -Achse abgelesen (*fringe analysis*). Hierbei kann keine Mehrdeutigkeit entstehen, da die Korrelationsfunktion nur eine Maximalstelle aufweist und sonst um den Wert Null pendelt. Die Genauigkeit der Bestimmung des Maximums ist wiederum vom SNR abhängig und beträgt bei guten Bedingungen etwa 1% der Halbwertsbreite (Campbell et al., 1992). Der reine Messfehler einer Laufzeitmessung kann wie folgt bestimmt werden:

$$\sigma_{\tau} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{SNR \cdot B} \cdot \quad (2.1-9)$$

Die Bandbreite des Messsystems geht also zweimal, einmal direkt und einmal über das SNR, in Gleichung (2.1-9) ein. Ende der siebziger Jahre wurden VLBI-Datenregistriersysteme entwickelt, die Bandbreiten bis 2 MHz zuließen, womit sich aus obiger Formel bei einem SNR von 50 bestenfalls eine Messauflösung von $\sigma_{\tau} = 1.6$ ns (0.5 m) ergab. Um damit den Zentimeterbereich auflösen zu können, müsste man die Bandbreite um den Faktor 50 erhöhen. Durch die Entwicklung der Bandbreitensynthese Anfang der siebziger Jahre am Haystack Observatory in Massachusetts (USA) ist es nicht mehr nötig, den gesamten Bandpass mit Frequenzen zu belegen, sondern es reicht aus die Signale, an den äußeren Rändern zu registrieren. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, ist es notwendig, auch an bestimmten Stellen dazwischen einige Frequenzkanäle anzuordnen. Die Theorie ist mit der Aperatursynthese bei Gruppenantennen und der so genannten Ambiguityfunktion bei Breitbandsignalen in der Radartechnik (Wohlleben und Mattes, 1973) eng verwandt. In Abb. 2-2 wird die Kreuzkorre-

2 Very Long Baseline Interferometry (VLBI)

lationsfunktion, wie sie durch die Verteilung der Frequenzkanäle im X-Band (8.4 GHz) entsteht, dargestellt.

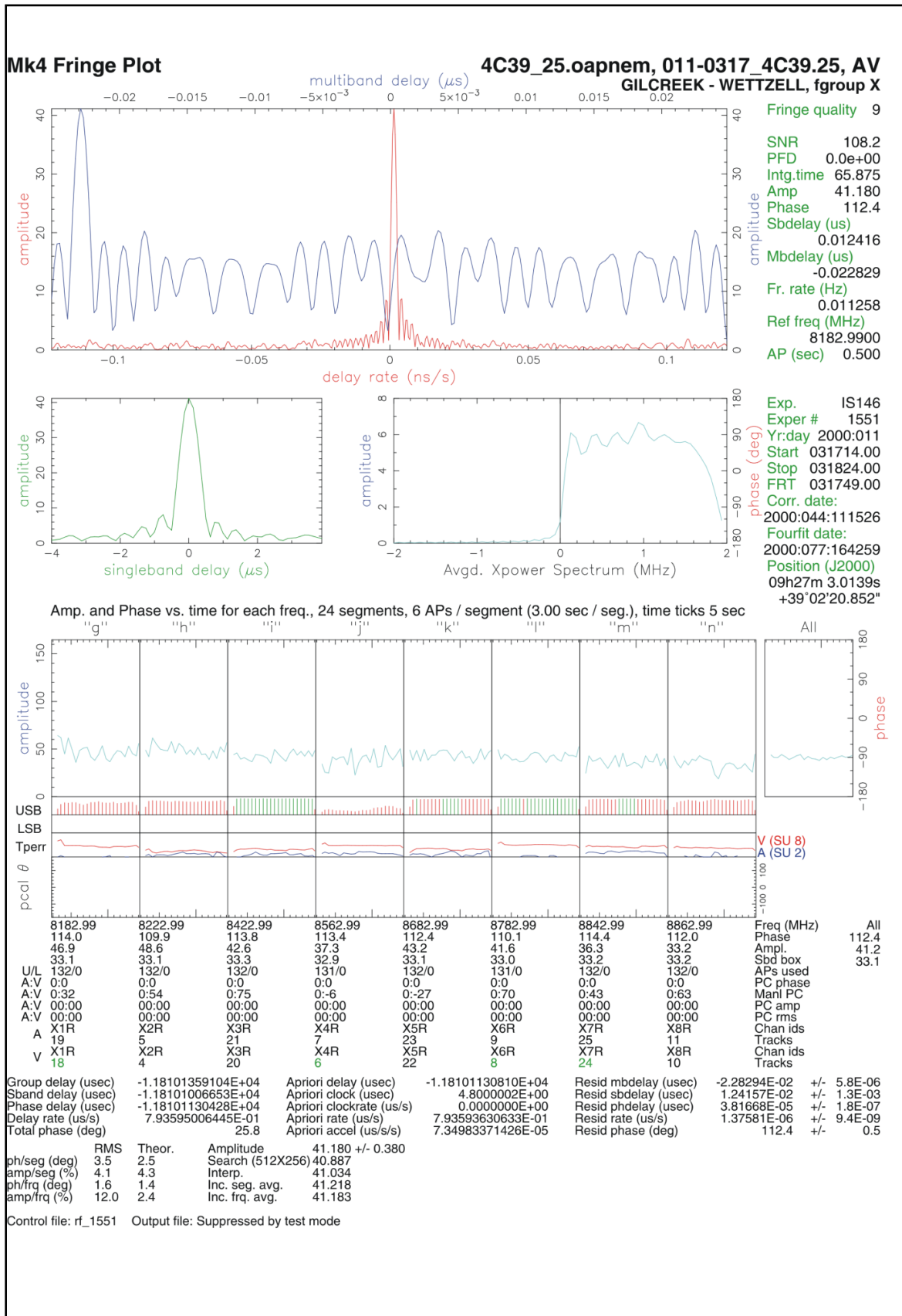


Abb. 2-2: Mark IV Korrelationsplot bei einer Bandbreitensynthese von 700 MHz (aus Campbell, 2000). Die Kreuzkorrelationsfunktion ist die blaue Linie im oberen Plot.

Im Abstand der Grundmehrdeutigkeit (kleinster Kanalabstand, siehe Tab. 2.2-1) von 1/20 MHz = 50 ns wiederholt sich dieses Muster. Die Halbwertsbreite des Korrelationsmaximums wird durch den größten Kanalabstand wie folgt definiert:

$$\Delta\tau_h = \frac{1}{f_{max} - f_{min}} . \quad (2.1-10)$$

Ebenfalls muss nun die instrumentelle Auflösung neu definiert werden:

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{1}{SNR \cdot B_{eff}} . \quad (2.1-11)$$

Die so genannte effektive Bandbreite B_{eff} ist als quadratischer Fehler aus den Abweichungen der einzelnen Kanalfrequenzen von deren Mittelwert zu berechnen, da die zum SNR beitragenden N Kanäle nicht alle an den äußeren Rändern des Bandbereiches liegen (Whitney et al., 1976)

$$B_{eff} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_m)^2}{N}} . \quad (2.1-12)$$

2.2 Technische Umsetzung

Um ein geodätisches VLBI-Experiment durchführen zu können benötigt man mindestens zwei Radioteleskope (mit dem notwendigen Zubehör) und einen Korrelator. Letzterer dient dazu, die Observablen zu ermitteln.

2.2.1 Die Beobachtungsstation

VLBI-Radioteleskope (Abb. 2-3) bestehen grundsätzlich aus einem beweglichen Hauptreflektor mit einem Empfangshorn (*feedhorn*), das je nach Bauweise des Teleskops entweder im Primär- oder im Sekundärfokus montiert ist. Damit im Sekundärfokus ein Empfang der Radiostrahlung möglich ist, benötigt man einen Subreflektor, der die Signale in das *feedhorn* lenkt. Für geodätische Anwendungen ist es notwendig, die Teleskope so zu bauen, dass eine hohe Fahrgeschwindigkeit ermöglicht wird, um schnell zwischen den verschiedenen Quellen wechseln zu können. Weiters soll das zuvor schon erwähnte SNR hoch sein. Da die meisten Radioquellen nur Flussdichten von unter einem Jansky ($1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ Wsm}^{-2}$) aufweisen, muss die Empfindlichkeit der Antennen und der weiteren Empfangssysteme entsprechend hoch ausgelegt sein. Durch die verwendete Beobachtungsfrequenz wird die Güte der Reflektoroberfläche bestimmt, damit genügend elektromagnetische Strahlung das Empfangshorn erreicht und nicht in andere Richtungen reflektiert wird. Die primäre Beobachtungsfrequenz liegt bei 8.4 GHz (X-Band), was einer Wellenlänge von 3.6 cm entspricht. Daher muss die Oberflächengenauigkeit des Radioteleskops mindestens 1.8 mm betragen (Nottarp und Kil-

ger, 1982). Zusätzlich beobachtet man in einer Frequenz von 2.3 GHz (S-Band), um die dispersiven Einflüsse bei der Signalausbreitung in der Ionosphäre bestimmen zu können (Hobiger, 2002).

Nachdem die Signale im Feedhorn gebündelt wurden, werden sie in die 8.4 und 2.3 GHz Frequenzbänder aufgespalten und auf getrennten Signalwegen weiterverarbeitet. Jedes Frequenzband wird im Empfänger, der aus rauscharmen Hochfrequenzverstärkern und Mischerstufen besteht, auf eine Zwischenfrequenz von etwa 300 MHz mit einer Bandbreite von 400 MHz heruntergemischt. Diese phasenstabile Konvertierung erfolgt mit Hilfe eines lokalen Oszillators, der von einem Frequenzstandard (in der Regel ein Wasserstoff-Maser) gespeist wird. Um unerwünschtes Rauschen zu verhindern, erfolgt die Verstärkung und Konvertierung direkt unterhalb des *feedhorns*. In einem Kontrollraum werden dann die Frequenzbänder in unterschiedliche Kanäle aufgespalten und mit dem lokalen Oszillator auf Basisfrequenzbänder von 0 bis 2 MHz heruntergemischt. In Tab. 2.2-1 werden mögliche Frequenzbänder des Mark IV Systems aufgelistet.

Tab. 2.2-1: Frequenzbänder des Mark IV Systems.

| X-Band | S-Band |
|--------------|--------------|
| 8 182.99 MHz | 2 212.99 MHz |
| 8 222.99 MHz | 2 222.99 MHz |
| 8 422.99 MHz | 2 257.99 MHz |
| 8 562.99 MHz | 2 297.99 MHz |
| 8 682.99 MHz | 2 317.99 MHz |
| 8 782.99 MHz | 2 322.99 MHz |
| 8 842.99 MHz | |
| 8 862.99 MHz | |



Abb. 2-3: Radioteleskop SVETLOE, Russland (Foto: J. Wresnik, 2008).

Die Aufspaltung dient der Synthetisierung einer möglichst großen Bandbreite und damit verbunden einer Erhöhung der Auflösung der Laufzeitdifferenzen. In einer Formatiereinheit werden die Signale digitalisiert und unter Berücksichtigung der Stationsuhr mit der Ankunftszeit versehen. Dies geschieht unabhängig voneinander an beiden Stationen und ist der eigentliche Messvorgang der geodätischen VLBI, obwohl die Messgröße erst in einem späteren Schritt am Korrelator ermittelt wird. Die Signale jedes einzelnen Kanals werden mit je zwei Bit pro Zyklus (4 Millionen Bit pro Sekunde für einen 2 MHz-Kanal) abgetastet, um das Rauschmuster für die Korrelation zu erhalten (Campbell et al., 1992). Die Stationsuhr, von der eine absolute Genauigkeit von $\pm 1 \mu\text{s}$ vorausgesetzt wird, wird ebenfalls von einem Wasserstoff-Maser-Frequenzstandard gespeist. In einem anschließenden Prozess werden die digitalisierten Signale mit den Zeitinformationen auf spezielle Magnetbänder oder Festplatten (Mark V, Abb. 2-4) geschrieben. Nach der Messung eines ganzen Experimentes werden alle zugehörigen Magnetbänder oder Festplatten an ein Korrelationszentrum gesandt, wo sie ausgewertet werden.

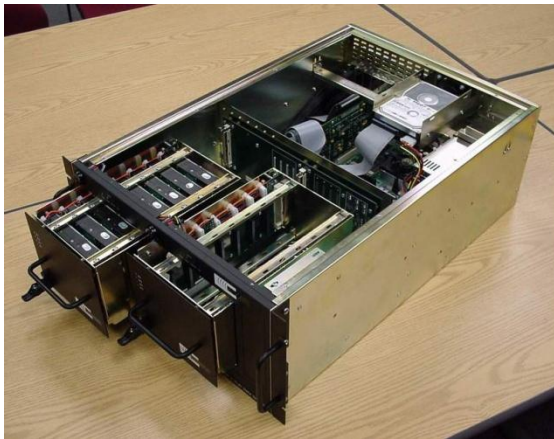


Abb. 2-4: Mark V Prototypgehäuse und „8-pack“ Modul (<http://web.haystack.mit.edu/mark5/>).

2.2.2 Der Korrelator

Beim Korrelator handelt es sich in der Regel um einen zweckgebundenen Prozessor, in dem die Überlagerung je zweier Signalströme in Form einer kreuzweisen Multiplikation der Bitströme vorgenommen wird (siehe Whitney, 2000). Vereinfacht dargestellt, ist die Identifizierung gleicher Signalkomponenten dann geglückt, wenn die Korrelationsamplitude über einem bestimmten Rauschpegel liegt (Campbell et al., 1992). Für die Berechnung sind Näherungswerte der Stationskoordinaten, Quellenpositionen und den Uhrengangunterschieden zu beschaffen, um eine theoretische Laufzeitverzögerung zu präzisieren. In der Umgebung dieses Wertes kann innerhalb eines sogenannten Suchfensters von wenigen Mikrosekunden auf der τ -Achse nach dem Korrelationsmaximum gesucht werden (Abb. 2-2).

Aufgrund der Rotation der Erde ändert sich die Konfiguration der Antennen ständig. Dadurch ist es möglich, die zeitliche Änderung der Laufzeitverzögerung $\dot{\tau}$ als sekundäre Beobachtungsgröße unabhängig von τ aus dem Korrelationsprozess zu bestimmen. Mittlerweile hat jedoch die Laufzeitänderung $\dot{\tau}$ an Bedeutung verloren und wird nur mehr für die Lösung der Mehrdeutigkeiten bei den Laufzeitunterschieden herangezogen.



Abb. 2-5: Der Korrelator am Max-Planck-Institut für Radioastronomie, Bonn, Deutschland. Racks mit (v.l.n.r.): zwei *Station Units* (SU) + zwei Mark 5A, zwei Mark 5A + Platz für *correlator interface boards* (CIB) sowie zwei Mark 5B + Platz für CIB. (Foto aus Alef et al., 2007)

2.2.3 Die Beobachtungen

Für die Koordinierung einer globalen Messreihe muss ein detaillierter Beobachtungsplan erstellt werden. Neben der geographischen Auswahl der beobachtenden Teleskope, welche die Netzstruktur festlegen, müssen vor allem Fahrzeiten der Teleskope, Horizontbeschränkungen und Empfangsbedingungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus sollten die zu beobachtenden Objekte (Quasare oder Galaxien) möglichst punktförmig erscheinen und gut über die beobachtete Sphäre verteilt sein. Als Ergebnis erhält man einen Beobachtungsplan, der jedem der am Experiment teilnehmenden Teleskope exakte zeitliche Fenster zuordnet, in denen gemeinsam eine Radioquelle zu beobachten ist. Dabei werden die Antennen durchschnittlich zwischen einer und fünf Minuten, je nach Flussdichte, auf die Radioquelle gerichtet. Für die Beobachtungsplanung, die eine bestmögliche Bestimmung der Zielparameter gewährleisten soll, stehen Computerprogramme wie z.B. SKED (Vandenberg 1999) zur Verfügung, die diese komplexen Planungsaufgaben teilweise oder vollständig automatisiert erledigen. Das Programm SKED wird vom IVS zur Planung der VLBI *sessions* verwendet. Kapitel 4.2 beschäftigt sich mit der Beobachtungsplanung mit SKED unter Verwendung verschiedener Strategien für das VLBI2010-System. Ein nicht in SKED implementierter Algorithmus, der eine gleichmäßige Quellenverteilung über den VLBI-Stationen gewährleisten soll, wird diskutiert.

2.2.4 Geodätische Auswertung

Die Zielparameter werden aus den Beobachtungsgrößen berechnet, die im Korrelator bestimmt wurden. Aufgrund der starken Überbestimmung bietet sich eine Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate, z.B. mit dem Gauß-Markov Modell oder mit einer Kalman Filter Lösung, an (siehe Kapitel 4.3). Abb. 2-6 zeigt den typischen Auswerteablauf, der bei allen Programmpaketen in der einen oder anderen Form implementiert ist (Campbell et al., 1992).

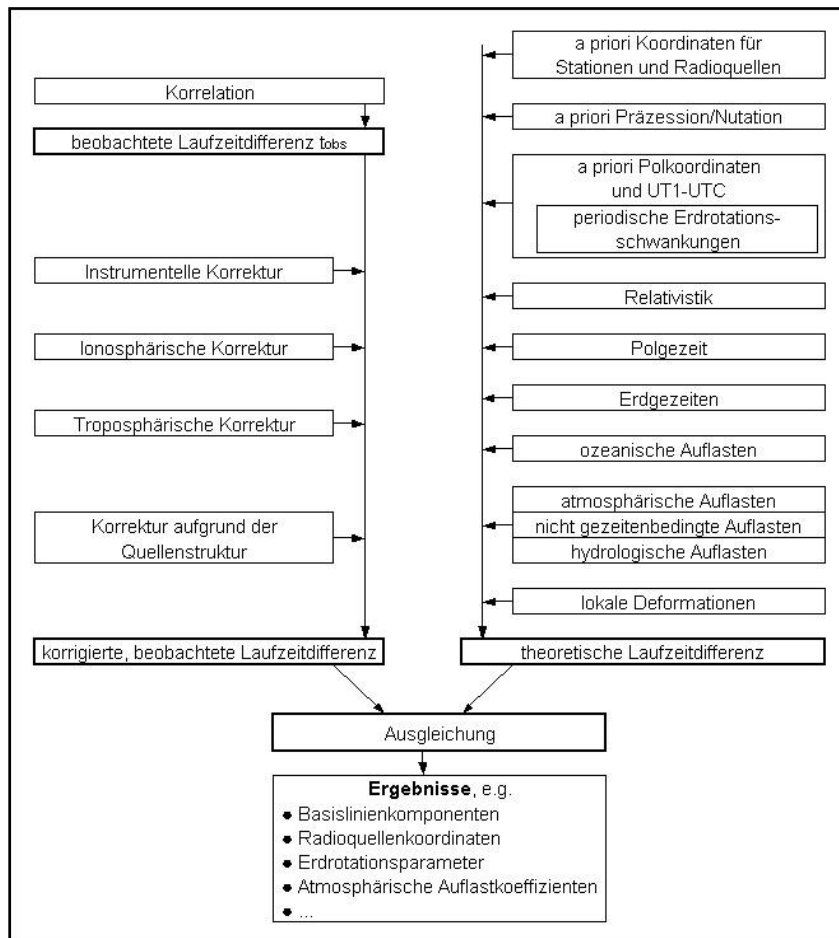


Abb. 2-6: Flussdiagramm eines geodätischen VLBI-Auswertesystems (aus Estermann, 2003).

Für die Auswertung von geodätischen VLBI-Messungen seien einige Programmpakete exemplarisch in Tab. 2.2-2 aufgelistet.

Tab. 2.2-2: Programmpakete zur geodätischen VLBI-Auswertung.

| | |
|------------|--|
| CALC/SOLVE | Vorwiegend am MIT in Cambridge, Massachusetts, von NOAA/NGS und NASA/GSFC in Washington D.C. entwickelt; |
| MODEST | von NASA/JPL in Pasadena, Kalifornien, entwickelt; |
| OCCAM | Ausgehend von dem Programm BVSS (Bonn VLBI-Software-System) ist eine Auswertesoftware entstanden, die unter anderem auch vom Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien laufend weiterentwickelt wird (Titov et al., 2004). |

Das Auswerteprogramm OCCAM wurde in der Version OCCAM 6.2 SIM in dieser Arbeit für die Auswertungen von Monte-Carlo-Simulationen für VLBI-Beobachtungen adaptiert und verwendet.

2.3 Systematische Fehlerquellen

Wie bei allen hochgenauen Messsystemen muss auch in der VLBI zwischen systematischen und zufälligen Fehlern unterschieden werden. Die Gruppe der systematischen Fehler wird hier in instrumentelle Fehlereinflüsse und Einflüsse durch das Medium aufgeteilt. Die meisten dieser auftretenden Fehler können durch geschickte Wahl der Messanordnung und/oder durch geeignete Modellbildung nahezu eliminiert werden.

2.3.1 Instrumentelle Fehlereinflüsse

Da es sich bei der VLBI um ein reines Differenzverfahren (man misst die Differenz der Ankunftszeiten der Wellenfronten) handelt, treten Additionskonstanten, wie zum Beispiel bei Lasermessungen, nicht auf. Dafür muss aber auf eine exakte Eichung der Signalwege vom Empfangshorn bis zum Aufbringen der Zeitmarken geachtet werden, um so unterschiedliche Laufzeiten in den einzelnen Bändern zu vermeiden. Betrachtet man die Gruppenlaufzeit als die Ableitung der Phase nach der Frequenz, Gleichung (2.1-3), so stellt man fest, dass eine kleine Abweichung zwischen den einzelnen Frequenzkanälen zu einem großen Einfluss auf die Gruppenlaufzeit führt. Daher ist eine Phasenkalibrierung für alle Kanäle notwendig. Diese erfolgt durch die Einspeisung von Referenzsignalen in das Erregerhorn. Die Signale durchlaufen dann den gleichen Signalweg wie die empfangenen Signale und werden bei der Korrelation zurückgewonnen. Als eigentliche Messgrößen werden die Differenzen zwischen den Signalen von der Radioquelle und den Kalibrationssignalen weiterverarbeitet. Man bezeichnet diese Komponente als *Phase and Delay Calibration System*, ohne die an eine hohe Genauigkeit der Gruppenlaufzeit nicht zu denken wäre (Rogers, 1980, oder Clark et al., 1985). Jedoch sorgt auch das *Phase and Delay Calibration System* für gewisse Komplikationen, da die Eichsignale durch Einflüsse von anderen elektronischen Komponenten verfälscht werden können.

Des Weiteren können bei dem Korrelationsvorgang Fehler auftreten, wenn es durch unsaubere Registrierung zu Datenverlusten gekommen ist.

Maßstabsfehler sind kaum zu erwarten, da der Maßstab über die Atomuhr in das System gebracht wird und sich ein Frequenzoffset von 10^{-10} (ca. $10 \mu\text{s/d}$) erst auf einer Basislinie von 10000 km Länge mit einem Fehler von 1 mm bemerkbar machen würde. Problematischer sind dagegen Deformationen der Antenne durch Gravitation, Winddruck und Temperaturschwankungen, die zu messbaren Fehlereinflüssen führen können. Durch Modellbildung gelingt es, diese Fehlereinflüsse weitgehend zu eliminieren (Wresnik, 2005).

2.3.2 Fehlereinflüsse durch das Medium

Auf dem Weg von den Radioquellen zu den Radioteleskopen an der Erdoberfläche durchlaufen die Signale auch die Ionosphäre und die neutrale Atmosphäre, in denen es zu Verzögerungen der Gruppenlaufzeiten kommt. Da die Ionosphäre für die in VLBI und GPS verwendeten Frequenzen ein dispersives Medium ist, kann der Effekt der Ionosphäre durch die Beobachtung in zwei Frequenzen sehr gut eliminiert werden (Hobiger, 2002).

Schwieriger ist die Situation bei der neutralen Atmosphäre, deren Einflüsse durch geeignete Verfahren möglichst gut modelliert werden müssen. (Böhm (Diss.), 2004).

2.4 Messung von zusätzlichen Parametern an der Station

Für eine Reihe von Aufgaben ist es von großer Bedeutung, dass die meteorologischen Parameter Luftdruck und Temperatur an den Stationen mit bestmöglicher Genauigkeit bestimmt werden. Während die Messung des Luftdrucks auch für die Bestimmung der Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung durch die trockenen Anteile der neutralen Atmosphäre (hydrostatische Laufzeitverzögerung) und der atmosphärischen Auflasteffekte verwendet werden kann (Petrov und Boy, 2003), kann die Temperatur für die Abschätzung der Antennendeformation herangezogen werden (Haas et al., 1999). Temperatursensoren, die in dem Bauwerk der VLBI-Antenne angebracht sind (Johansson et al., 1996), liefern realistischere Abschätzungen der Vertikalbewegung der Antennenstruktur (Wresnik et al., 2007a), jedoch sind nur wenige Radioteleskope mit solchen Sensoren ausgestattet.

Eine zusätzliche Messeinrichtung ist z.B. ein Wasserdampfadiometer (*water vapor radiometer*, WVR). Mit Hilfe eines WVR kann man die *brightness temperature* (Elgered, 1982) messen und über den Anteil des Wasserdampfes in der Atmosphäre die feuchte Laufzeitverzögerung berechnen. Vergleiche zwischen feuchten Laufzeitverzögerungen in Zenitrichtung (*zenith wet delay*, ZWD), die aus benachbarten geodätischen Weltraumverfahren bestimmt wurden, (VLBI, GNSS) und WVR Ergebnissen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit einer Korrelation von 0.95 und einen sehr kleinen Bias von wenigen Millimetern zwischen den Techniken (Behrend et al., 2000; Niell et al., 2001; Behrend et al., 2002; Snajdrova et al., 2006). Die Verwendung der ZWDs aus WVR-Messungen, um geodätische VLBI-Beobachtungen zu kalibrieren zeigten bisher nur geringe Verbesserungen (Elgered et al., 1991; Elgered und Davis, 1993; Emdarson et al., 1999; Nothnagel et al., 2007). Weitere intensive Untersuchungen zur Bestimmung des ZWD mittels WVR werden z.B. am *Onsala Space Observatory* (OSO), Schweden, und am *National Institute of Information and Communications Technology* (NICT), Japan, durchgeführt.

3 VLBI2010

VLBI ist eine der wichtigsten Techniken, die zur Bestimmung des *Terrestrial Reference Frame* (TRF) und des *Celestial Reference Frame* (CRF) beitragen. VLBI liefert als einziges geodätisches Weltraumverfahren den *International Celestial Reference Frame* (ICRF), die Verknüpfung von ICRF und *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF) mit dem vollen Satz der Erdorientierungsparameter (EOP), im Besonderen dUT1 (Differenz zwischen koordinierter Weltzeit UTC und *Universal Time No. 1* UT1) und Nutation. Das bestehende VLBI-System wurde größten Teils in den 1960er und 1970er Jahren entwickelt und gebaut. Die alternden Antennen, eine Häufung von Interferenzproblemen, veraltete Elektronik und die hohen Instandhaltungs- und operationellen Kosten machen es zunehmend schwieriger, das System und somit die erforderliche Genauigkeit, die Verlässlichkeit sowie die langjährige Beobachtungszeitreihe, zu erhalten. Um dieser Entwicklung entgegenzuwirken, wurde vom IVS (*International VLBI Service for Geodesy and Astrometry*) die Arbeitsgruppe 3 (WG3) ins Leben gerufen, um die Entwicklung des zukünftigen geodätischen VLBI-Systems, welches VLBI2010 genannt wurde, voranzutreiben.

Im Folgenden werden das Konzept des VLBI2010-Systems und die sich daraus ergebenden Spezifikationen angeführt (Behrend et al., 2008).

3.1 Das Konzept für VLBI2010

Zwei Jahre lang arbeitete die WG3 Konzepte für ein neues VLBI-System aus. Im Speziellen wurden die Beobachtungsstrategie, Frequenzen und Zeitnormale, das *back end system* (Empfangs- bis Aufzeichnungseinheit), die Datenaufzeichnung und der Transport bzw. die Übermittlung der Daten, die Korrelation und das Auffinden von *fringes*, die Datenanalyse sowie die Datenarchivierung und das Datenmanagement untersucht. Die Ergebnisse der WG3 sind in einem Abschlussbericht „*vision paper on the future VLBI*“ (Niell et al., 2006) zusammengefasst, welcher die Arbeit der WG3 2005 beendete. Der IVS etablierte das VLBI2010-Komitee (V2C) als eine permanente wissenschaftliche Einrichtung, die sich zum Ziel gesetzt hat, die für das VLBI2010-System notwendigen Änderungen zu evaluieren und den Einfluss eines neuen VLBI-Systems auf die Endprodukte des IVS zu untersuchen. Die Untersuchungen des V2C gehen Hand in Hand mit den Bemühungen des *Global Geodetic Observing System* (GGOS) (Perlman et al., 2006) der *International Association of Geodesy* (IAG). Der IVS richtete die Ziele für VLBI2010 auch nach den von GGOS geforderten Zielen wie der Bestimmung einer Basislinie mit einer Genauigkeit von 1 mm und der Stabilität von 0.1mm/Jahr. Um dies zu erreichen, wurden die Eigenschaften für das VLBI2010-System basierend auf den folgenden Untersuchungen formuliert:

- Empfehlungen für zukünftige IVS-Produkte, beschrieben im Report der Arbeitsgruppe 2 (WG2) (Schuh et al., 2002),
- Anforderungen des GGOS der IAG,
- Wissenschaftlich notwendige geodätische Ziele, angeführt im amerikanischen *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) *Solid Earth Science* Arbeitsgruppen Report (SESWG).

Um die gesteckten Ziele auch realisieren zu können, forscht das V2C in den verschiedensten Facetten des VLBI-Systems. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Reduktion der dominierenden Fehlereinflüsse, den einzelnen Messgeräten und den Strukturen der Radioquellen. Im Rahmen des V2C wurden folgende Strategien verfolgt:

- Reduktion der zufälligen Komponente des Fehlers der Gruppenlaufzeitdifferenz, z.B. Reduktion des Beobachtungsfehlers, der stochastischen Eigenschaften der Atomuhr und den unzureichend modellierten Variationen der Atmosphäre,
- Reduktion von systematischen Fehlern, z.B. die thermische Verformung und Verformung aufgrund von Gravitationseinflüssen auf die VLBI-Antennen, Driftverhalten der Elektronik und die Strukturen der Radioquellen, sowie deren zeitliche Veränderungen,
- Verdichtung des Stationsnetzwerks und bessere globale Verteilung der VLBI-Stationen in dem gesamten Netzwerk,
- Erhöhung der Beobachtungsdichte, also die Anzahl der Beobachtungen pro Zeiteinheit,
- Reduktion der Empfindlichkeit gegenüber externen Radiofrequenzinterferenzen.

In Tab. 3.1-1 sind die Eckdaten des neuen VLBI2010-Systems zusammengefasst und dem derzeitigen VLBI-System gegenübergestellt.

Tab. 3.1-1: Systemcharakteristik des VLBI2010- und des bestehenden VLBI-Systems

| | bestehende VLBI-System | VLBI2010-System |
|---------------------|---|---|
| Antennengröße | 5–100 m Reflektor | ~ 12 m Reflektor |
| Drehgeschwindigkeit | ~20–200 °/min | ≥ 360 °/min (≥ 6°/s) |
| Sensitivität | 200–15 000 SEFD | ≤ 2 500 SEFD |
| Frequenzbereich | S/X band | ~2–15 (18) GHz |
| Aufzeichnungsrate | 128 / 256 Mbps | 8–16 Gbps |
| Datentransfer | Diskversand, gelegentlich e-transfer | e-transfer, e-VLBI, Diskversand wenn notwendig |

3.2 Reduktion des Messfehlers pro Beobachtung

Die Weiterentwicklungen in der Elektrotechnik haben es ermöglicht, gleichzeitig mehrere (vier oder mehr) Frequenzbänder verteilt über eine große Frequenzbreite, z.B. 2 GHz bis 15 GHz (Abb. 3-1) zu nützen. Analysen zeigten, dass man mit einem System, das ein breites Frequenzspektrum verwendet, die VLBI-Phasenmehrdeutigkeiten zuverlässiger lösen kann. Die typische Auflösung liegt dann bei 2.5 ps (weniger als 1 mm) (Petrachenko, 2007), für bestehende Systeme liegt dieser Wert im Mittel bei 30 ps. Um zu garantieren, dass die Verwendung eines breiten Frequenzspektrums den gewünschten Erfolg bringt, unterstützt die amerikanische *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) ein *Research and Development* (R&D) Projekt, um ein solches System tatsächlich zu bauen und die Performance des Systems unter tatsächlichen Bedingungen zu evaluieren und genauestens zu untersuchen. Die größten Verbesserungen verspricht das System für folgende Fehlerquellen:

- *radio frequency interference* (RFI),
- realistische Quellenstrukturen und
- Reduktion der unkalibrierten Instrumentenoffsets.

Die schematischen Komponenten des neuen Systems sind:

- zweifach linearpolarisiertes Breitband Empfangshorn von 2 GHz bis ~ 15 GHz (Abb. 3-2),
- rauscharme Breitband Verstärker für 2 GHz bis 15 GHz,
- digitale Aufzeichnungseinheiten (*Digital Back Ends*, DBE) mit vier 512 MHz Kanälen und einer 2 bits/sample Aufzeichnungsrate,
- Mark 5B+ Aufzeichnungsgeräte mit 2 Gbps (Whitney, 2007).

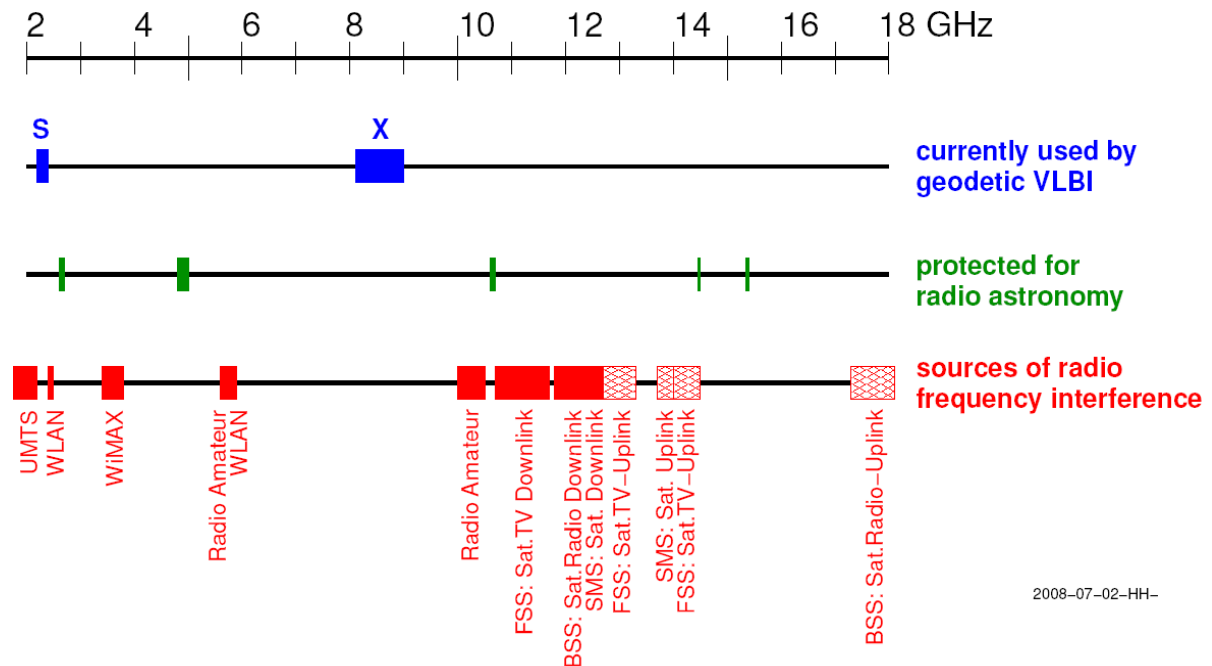


Abb. 3-1: Frequenzbereich des derzeitigen VLBI-Systems, Frequenzbereich der Radioastronomie und kommerziell genutzte Frequenzbereiche am Frequenzband des VLBI2010-Systems, von 2 – 15 (18) GHz. (Grafik von Hayo Hase, [IVS-v2c] In response to the: Draft of the frequency memo. 29.07.2008)

Erste Testversuche werden über die 600 km lange Basislinie zwischen der 18 m Antenne in WESTFORD (Boston, USA) und der 5 m Antenne GGAO am Goddard Space Flight Center (Washington, D.C., USA) realisiert. Das Testsystem zeichnet linear polarisierte Signale mit vier 500 MHz-Bändern, die unabhängig voneinander im Frequenzbereich zwischen 2 und 12 GHz positioniert werden können, auf. Die Datenrate beträgt dabei 8 Gbps mit einer Mark 5B+ Aufzeichnungseinheit und zwei DBEs (Whitney et al., 2007).



Abb. 3-2: ETS-Lindgren *quad-ridge* Breitband Feed-Horn (ETS-Lindgren, 2007) in einem Hitzeschild verbunden mit einem 15 K Tieftemperaturkühler (Kühlflüssigkeitsbehälter rechts im Bild) (Foto aus Behrend et al., 2008).

3.3 Korrekturen aufgrund von Quellenstrukturen

Wenn das Ziel für das zukünftige VLBI-System eine Positionsbestimmung mit 1 mm Genauigkeit ist, muss der Quellenstruktur mehr Aufmerksamkeit zugewendet werden. Gerade für den Wechsel auf ein Breitbandsystem stellt die Quellenstruktur eine große Fehlerquelle dar, die eine VLBI-Auswertung erschwert. Daher müssen zukünftig sehr genaue Quellenstrukturmodelle zur Reduktion des Quellenstrukturfehlers angewandt werden. Als Beispiel sieht man in Abb. 3-3 (Charlot, 2002) links eine Umrissdarstellung der X-Band Radioemission für eine Radioquelle mit Quellenindex 3 (siehe Abbildungsbeschreibung) und in der rechten Abbildung die dazugehörigen Absolutwerte des strukturierten *delays* für diese Radioquelle für eine Basislinienlänge bis zur Länge des Erddurchmessers.

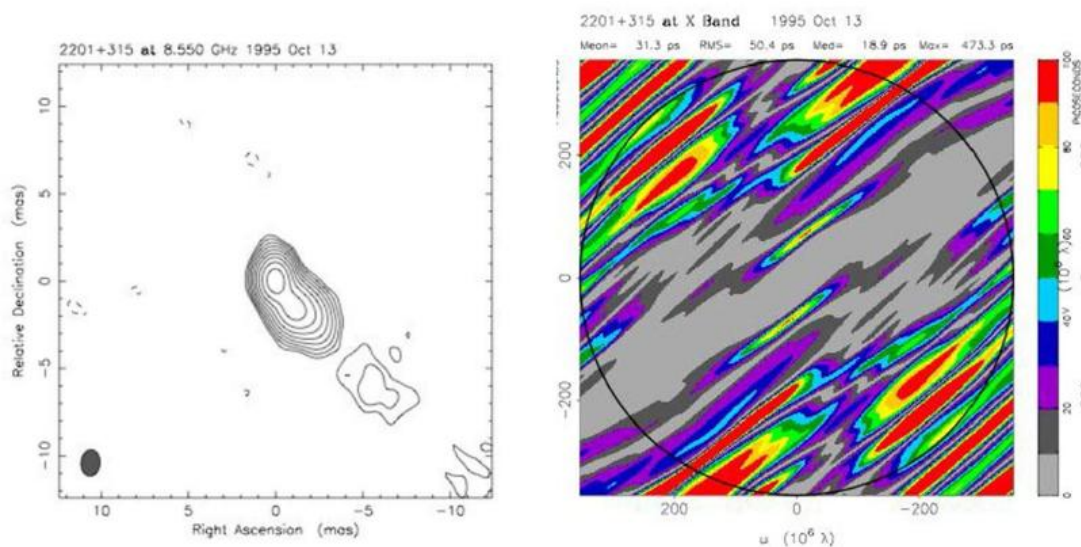


Abb. 3-3: Links: Umrissdarstellung einer X-Band Radiostrahlung für eine Radioquelle mit dem Strukturindex 3. Der Strukturindex 3 sagt aus, dass der Median des Strukturfehlers über alle möglichen Basislinien zwischen 10 und 30 ps beträgt. Rund 35% der derzeit definierenden ICRF-Radioquellen fallen in diese Klasse. Rechts: Die dazugehörigen Absolutwerte des strukturierten *delays*.

Es gibt aber auch eine zeitliche Variation der Radioquellenstruktur, wie es für eine typische X-Band Radioquelle, die regelmäßig durch den IVS beobachtet wird, in Abb. 3-4 (Charlot, 2002) dargestellt ist. Mit dem derzeitigen VLBI-System ist es nicht möglich, dieses Phänomen zu modellieren und Korrekturen dafür anzubringen. Das VLBI2010-System hingegen ist durch das neue Beobachtungskonzept, welches größere Netzwerke einbindet und eine sehr große Anzahl an Beobachtungen hat, geeignet, die *UV coverage* (UV-Abdeckung) durch präzise Quellenstrukturbilder der ICRF-Radioquellen zu verbessern. Wenn tägliche VLBI-Bilder der ICRF-Quellen direkt aus der geodätischen Beobachtung konstruiert werden können, kann man die Korrektur aufgrund von Quellenstrukturen berechnen. Simulationen in diesem Zusammenhang werden derzeit von Arnaud Collioud (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux, Frankreich) durchgeführt, um das Potential dieses Ansatzes abzuschätzen. In Abb. 3-5 sieht man die typische *UV coverage* für eine IVS-Quelle bei einem R1-Experiment zur Bestimmung der EOP im Vergleich zu einer simulierten *UV coverage* eines VLBI2010-Beobachtungsplanes.

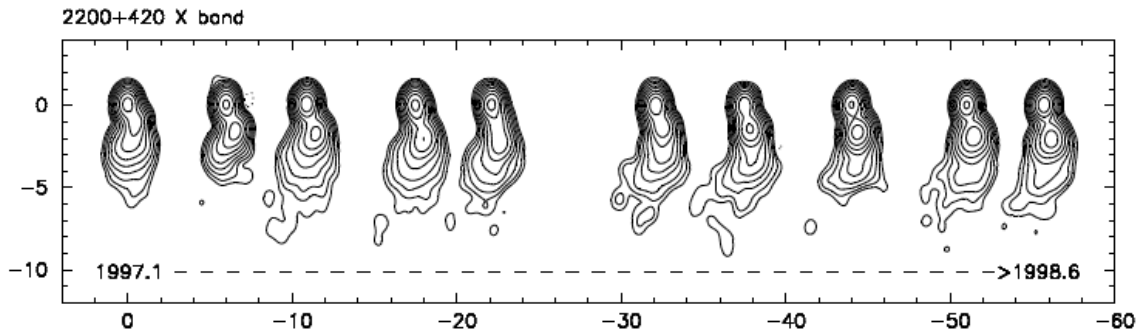


Abb. 3-4: VLBI-Darstellungen der Radioquelle 2200+420 im X-Band für 10 aufeinanderfolgende Epochen von 1997.1-1998.6. (aus Fey et al., 2002).

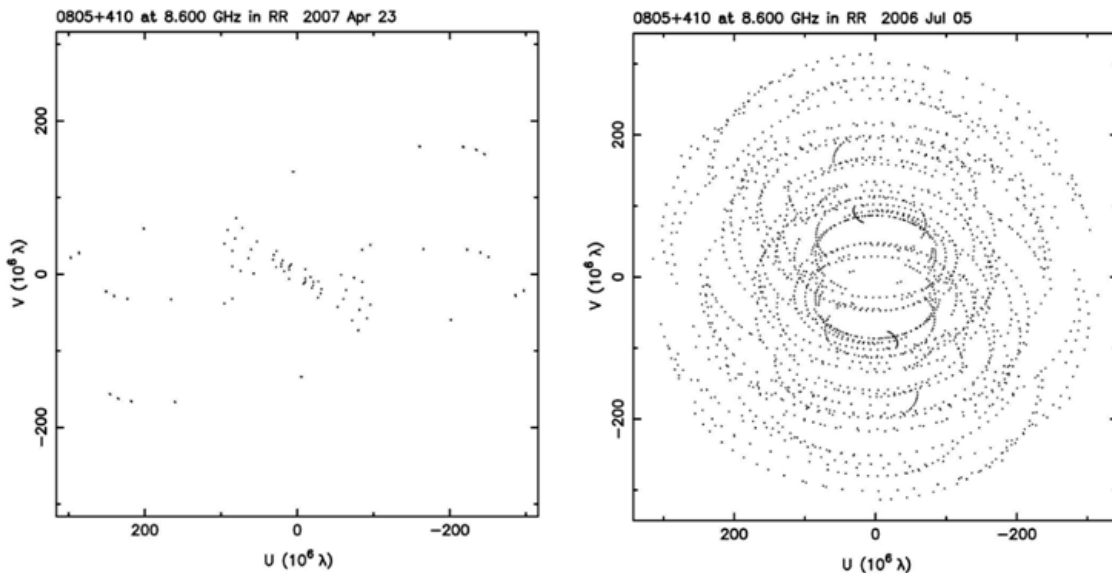


Abb. 3-5: Links: *UV coverage* eines typischen R1-VLBI-Experiments. Rechts: *UV coverage* für einen VLBI2010-Beobachtungsplan.

4 Monte-Carlo-Simulation

Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. So lautet die Definition in der Richtlinie 3633 des Vereins der Deutschen Ingenieure (VDI). Eine weitere Erklärung liefert Naylor (1966): Die Simulation ist eine numerische Methode, mit der Experimente am Computer durchgeführt werden. Für diese Experimente benötigt man ein mathematisches und logisches Modell, welches das Verhalten eines Systems über eine bestimmte Periode der Echtzeit beschreibt.

Dieses System kann dabei als eine Menge von Komponenten oder Elementen verstanden werden, die in Beziehung zueinander stehen und bestimmte Attribute oder Eigenschaften annehmen können. Die Eigenschaften und Beziehungen zwischen den Elementen beeinflussen die einzelnen Elemente und in weiterer Folge das gesamte System. Offene Systeme reagieren auf Einflüsse von außen, geschlossene nicht. Der Zustand eines Systems wird durch die jeweiligen Attribute der einzelnen Elemente beschrieben. Ändern sich die Werte der Attribute (Input), so wechselt das gesamte System in einen neuen Zustand (Output) (Abb. 4-1). In vielen Fällen ist das Verhalten der einzelnen Elemente eines Systems nicht exakt bestimmt und wird über einen Mittelwert zufälliger Beobachtungen gebildet. Ein System ist in einem Gleichgewichtszustand, wenn die Wahrscheinlichkeit, mit der sich das System in einem bestimmten Zustand befindet, nicht von der Zeit abhängt. Als stabile Systeme werden jene bezeichnet, die nach Einwirken eines unerwarteten Einflusses von außen nach einiger Zeit wieder in einen Gleichgewichtszustand übergehen. Ist dies nicht der Fall, so handelt es sich um instabile Systeme.

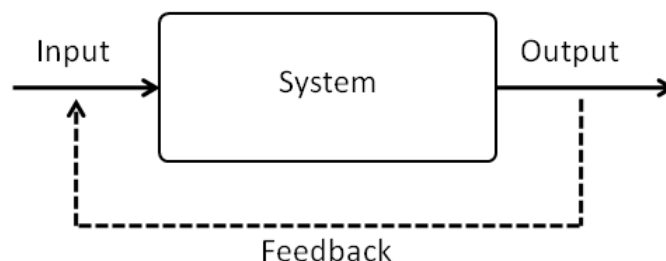


Abb. 4-1: Schematische Darstellung eines Systems

Ein Modell versucht ein reales System so zu abstrahieren, dass alle Zustände des Systems möglichst genau beschrieben werden. Dafür stehen mathematische und logische Ausdrücke, aber auch analoge Modelle zur Verfügung. Mathematische Modelle unterteilen sich in statische, die von der Zeit unabhängig, und dynamische, die von der Zeit abhängig sind. Das Ohm'sche Gesetz, $U = I \cdot R$, ist ein statisches System, der freie Fall, $v = g \cdot t = \sqrt{2g \cdot h}$, hingegen ein dynamisches. Sind alle mathematischen und logischen Beziehungen zwischen den einzelnen Elementen genau bestimmt, so spricht man von einem deterministischen Modell. Wird jedoch mindestens eine Variable durch eine Zufallszahl bestimmt, so spricht man von einem stochastischen Modell. Ein Modell kann in der Regel keine genaue Approximation des realen Systems sein, ohne den mathematischen und den damit verbundenen Zeitaufwand in Grenzen zu halten. Ziel eines Modells sollte es sein, eine hohe Korrelation zwischen den damit berechneten Vorhersagen und den tatsächlichen Ereignissen eines Systems in der

Realität zu erreichen und dadurch den Rechenaufwand und damit korrelierenden Zeitintensität so gering als möglich zu halten.

Die Simulation steht mit dem realen System und dessen Modell in sehr enger Beziehung. Durch die Simulation erwartet man Probleme, Experiment oder Auswirkungen des realen Systems anhand von Ergebnissen, die das Modell liefert, zu beantworten. Dabei gibt es zwei Hauptmerkmale zu beachten:

- wie gut bildet das Simulationsmodell das reale System ab und
- wie lassen sich die formalen Ergebnisse der Simulation am Modell auf das reale System übertragen.

In dieser Arbeit wurde als Simulationsmethode die Monte-Carlo-Methode angewandt. Die Bezeichnung ist eine Anspielung auf den für Glücksspiele bekannten Ort, da die Grundlage des Verfahrens Zufallszahlen sind, wie man sie auch mit einem Roulette-Rad erzeugen könnte.

Die Monte-Carlo-Simulation oder stochastische Simulation kann definiert werden als Methode zur Modellierung von Zufallsgrößen mit dem Ziel, spezielle Eigenschaften ihrer Verteilungen zu berechnen. Als Ergebnis erhält man eine Menge von Lösungen, die statistisch ausgewertet werden können. Die erste Idee zur Ausnützung zufälliger Erscheinungen auf dem Gebiet der numerischen Rechnung stammt aus dem Jahr 1873, als die Arbeit von Hall (1873) über die Bestimmung der Zahl π durch zufälliges Werfen einer Nadel auf liniertes Papier erschien. Das Wesen der Sache besteht darin, dass man experimentell Ergebnisse nachbildet, deren Wahrscheinlichkeit durch die Zahl π ausgedrückt wird, und dass man diese Wahrscheinlichkeit näherungsweise abschätzen kann (Ermakow, 1975). Eine detaillierte Beschreibung dieses Experiments ist in Prochorov und. Rozanov (1967, englische Übersetzung 1969) nachzulesen. Analoge Überlegungen (Hammersley und Handscomb, 1964) verhalfen diesem Ansatz zu keinem weiteren Fortschritt. Erst im Jahr 1944 begann die Entwicklung, den Apparat der Wahrscheinlichkeitstheorie für die Lösung angewandter Aufgaben mit Hilfe der EDV auszunutzen. Die eigentliche Erarbeitung der Monte-Carlo-Methode begann mit dem Atombombenprojekt von John von Neumann. Eine erste systematische Darstellung des Problems wurde erstmals von Metropolis und Ulman (1949) publiziert.

Ursprünglich wurde die Monte-Carlo-Methode zur Lösung von Aufgaben der Neutronenphysik genutzt, bei denen die traditionellen numerischen Methoden wenig brauchbar sind. Für Aufgaben der statistischen Physik, die ihrem Inhalt nach sehr verschieden sind, zeigte sich die Monte-Carlo-Methode als sehr hilfreich. Zu Wissenschaftszweigen, die auch in großem Maße davon profitieren, muss man die Bedienungstheorie, die Spieltheorie und mathematische Ökonomie sowie die Theorie der Nachrichtenübertragung beim Vorhandensein von Störungen zählen (Ermakow, 1975). Sie dient auch als wesentliches Werkzeug zur Entwicklung von Methoden der numerischen Mathematik wie z.B. von numerischen Integrationsverfahren.

Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode ist für Aufgaben gerechtfertigt, die eine Wahrscheinlichkeitstheoretische Beschreibung erlauben. Um eine Simulation durchführen zu können, müssen die gewünschten Parameter stochastisch variiert werden. Dafür sind die statistischen Kenngrößen erforderlich, welche direkt durch die Modellbeschreibung gegeben sein können, wie z.B. die Lebensdauer eines bestimmten Werkstoffes. Für die im Weiteren beschriebene Arbeit sind die Kenngrößen entweder durch Messreihen am realen System (VLBI-Analyse) oder aus der von der WG3 durchgeführten VLBI2010-Systembeschreibung bekannt. Die somit gefundenen Verteilungen für die Parameter werden durch Pseudozufallszahlen simuliert (Kapitel 4.1.1 - 4.1.4). Führt man eine Monte-Carlo-Simulation mit n Simulationen durch, so erhält man eine Stichprobe von n verschiedenen Lösungen, die mit statistischen

Methoden ausgewertet werden können. Es bieten sich nun zwei Möglichkeiten die Monte-Carlo-Simulation durchzuführen:

- Man führt m Monte-Carlo-Simulationen mit n Simulationsläufen durch. Für jede der m Stichproben wird das Stichprobenmittel und die Stichprobenvarianz ermittelt. Da diese ebenfalls stochastische Größen sind, kann die Verteilung des Stichprobenmittels und der Stichprobenvarianz ermittelt werden.
- Man führt eine Monte-Carlo-Simulation mit n Simulationsläufen durch. Bei der statistischen Auswertung erhält man nur mehr ein Stichprobenmittel und eine Stichprobenvarianz. Ist die Anzahl der Simulationsläufe groß, dann sind Stichprobenmittel und Stichprobenvarianz ein sehr guter Schätzer für Mittelwert und Varianz (Brenner, 1995).

Einer Monte-Carlo-Simulation folgt eine statistische Auswertung, deren Ergebnisse umso wahrscheinlicher sind, je größer die Anzahl n der Simulationsläufe ist. Vergrößert man n führt das zu einem erhöhten Zeitaufwand. Hier gilt es n so abzuschätzen, dass die Rechen-dauer so gering als möglich ist ohne die Ergebnisse der Simulation zu schwächen (Kapitel 4.1).

4.1 Der Monte-Carlo-Simulator für VLBI2010

Um VLBI-Beobachtungen simulieren zu können, wurde in dieser Arbeit ein Monte-Carlo-Simulator (MCS) entwickelt. Die Simulation beruht auf der synthetischen Erzeugung des verkürzten Beobachtungsvektors $o - c$ (Gl. (4.1-1)). Das Modell dafür setzt sich aus den drei größten stochastischen Fehlern einer VLBI-Beobachtung zusammen (Abb. 4-2).

$$o - c = (zwd_2 \cdot mfw_2(e_2) + cl_2) - (zwd_1 \cdot mfw_1(e_1) + cl_1) + wn_{BSI} \tag{4.1-1}$$

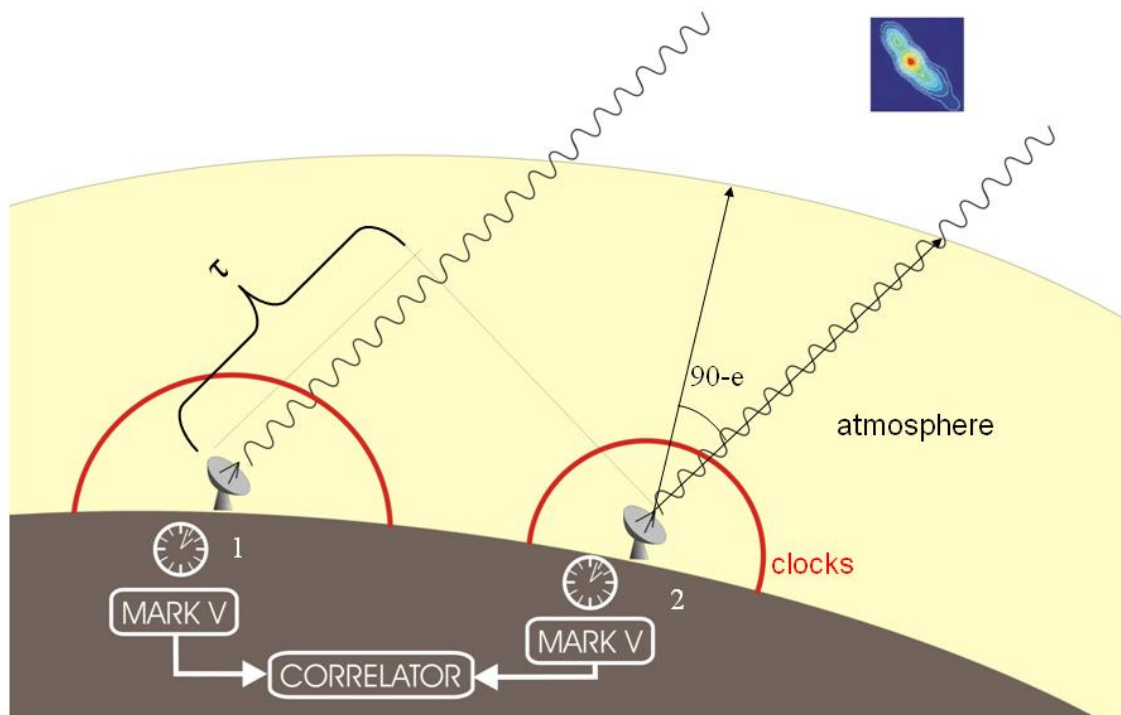


Abb. 4-2: Schematische Darstellung der stochastischen Fehlereinflüsse der Atmosphäre und der Stationsuhr auf eine VLBI-Beobachtung.

Hier wird $zwd_{1,2}$ (*zenith wet delay*), die feuchte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung an den VLBI-Stationen 1 und 2 vorerst mittels *random walk* (Kapitel 4.1.3) und in weiterer Entwicklung des MCS mit einem Turbulenzmodell (Kapitel 4.1.4) simuliert. Als $mfw_{1,2}$ (*mapping function wet*), Projektionsfunktion für den feuchten Anteil der Atmosphäre wird die Niell *mapping function* (Niell et al., 2002) verwendet, $e_{1,2}$ ist die Elevation der Beobachtungen an den VLBI-Stationen 1 und 2. Die VLBI-Stationsuhr $cl_{1,2}$ wird mit einem *random walk plus integrated random walk* (Kapitel 4.1.2) und instrumentelle Fehlereinflüsse (Beobachtungsfehler) werden mit einem weißen Rauschen (*white noise*), wn_{Bsl} (Kapitel 4.1.1) simuliert. Die Entwicklung des MCS wurde mit dem Programm Matlab 7.1 durchgeführt (Anhang B) und in weiterer Folge direkt in die VLBI-Auswertesoftware OCCAM 6.2 SIM implementiert.

Um die geeignete Anzahl der Simulationsläufe abschätzen zu können wurde der MCS mit der von A. Pany entwickelten VLBI *Precise Point Positioning* (PPP) Software getestet (Pany, 2008). PPP schätzt die Parameter für die feuchte Laufzeitverzögerung und die VLBI-Stationsuhr an einer VLBI-Station und ermöglicht es mit sehr geringem Zeitaufwand eine sehr große Anzahl verschiedener Parametrisierungen zu berechnen. Der verkürzte Beobachtungsvektor wird analog zu dem in OCCAM 6.2 SIM implementierten MCS erzeugt. Der 3D-Positionsfehler für eine PPP-Simulation mit einer sehr turbulenten Atmosphäre (z.B. an der Station Fortaleza, Brasilien) ist in Abb. 4-3, links gezeigt. Für diese extrem turbulente Atmosphäre wurde die Standardabweichung des 3D-Positionsfehlers von zwei bis 250 Realisierungen berechnet (Abb. 4-3, rechts). Betrachtet man die Abbildungen, so kann man sehen, dass sich die Standardabweichung ab 60 Wiederholungen nur noch geringfügig ändert.

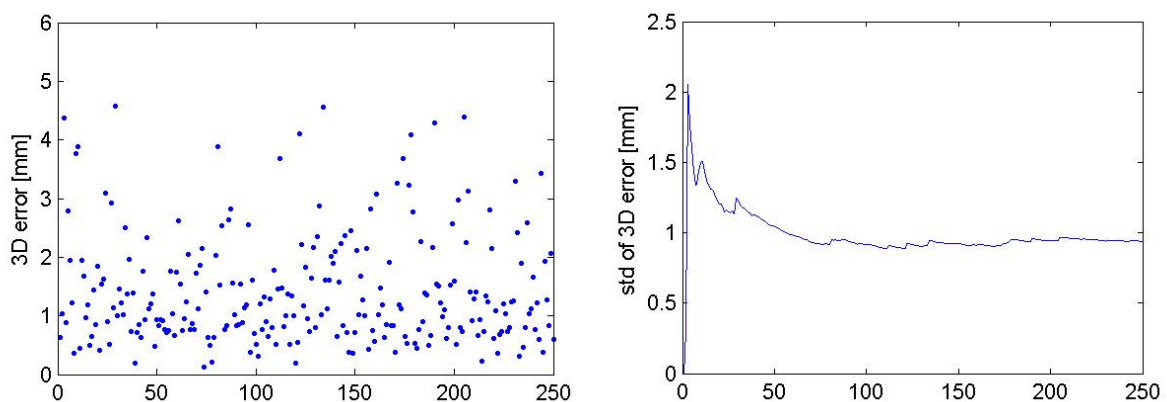


Abb. 4-3: Links: 3D-Positionsfehler für eine Monte-Carlo-Simulation mit 250 Simulationsläufen. Die Auswertung erfolgte mit dem Simulationsprogramm PPP; Rechts: Standardabweichung der 3D-Positionsfehler für eine Monte-Carlo-Simulation, von zwei bis 250 Simulationsläufen.

Ein weiterer Test wurde mit OCCAM 6.2 SIM durchgeführt. Dabei wurde das RMS der 3D-Stationenposition für die erste *session* der kontinuierlichen VLBI-Beobachtung CONT05 für 25 und 99 Simulationsläufe verglichen. Die Differenz des RMS der 3D-Position der einzelnen Stationen beträgt maximal 1.8 mm (VLBI-Station SVETLOE) und im Mittel 0.15 mm. Auch der Medianwert von 8.9 mm für 25 und 8.7 mm für 99 Simulationsläufe stimmen dabei sehr gut überein (Abb. 4-4).

Da es sich bei der in PPP verwendeten simulierten Atmosphäre um einen Maximalwert handelt, und aufgrund der extrem langen Rechenzeiten des MCS in OCCAM 6.2 SIM ($\sim 100\,000$ Beobachtungen mit 25 Simulationsläufen benötigen 21 h) wurde die Anzahl der Simulationsläufe mit 25 festgelegt.

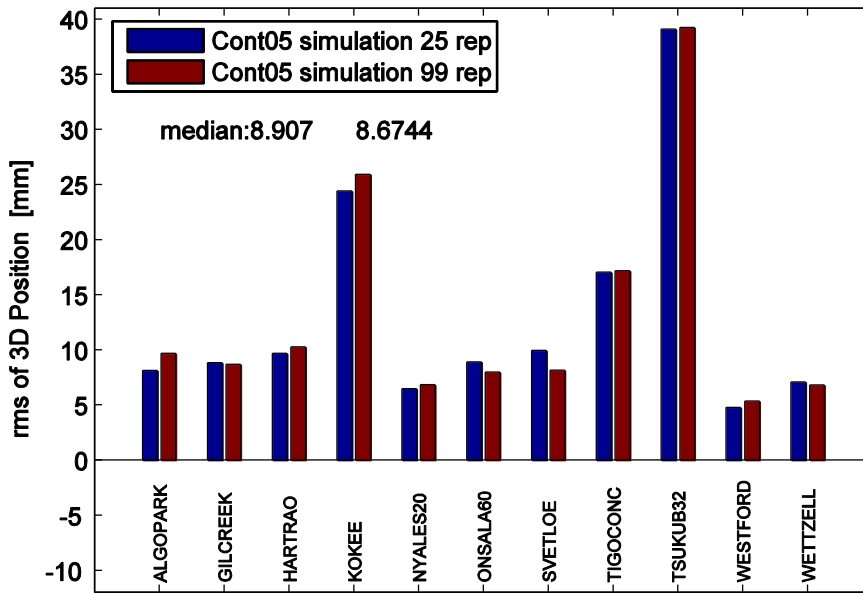


Abb. 4-4: RMS der 3D-Stationsposition für eine Monte-Carlo-Simulation der ersten CONT05 session mit 25 (blau) und 99 (braun) Simulationsläufen.

Um die Modellierung der folgenden stochastischen Prozesse leichter verstehen zu können, folgt eine Übersicht der Charakteristik von stochastischen Prozessen (aus Herring et al., 1990). Das erste Element des Namens jedes Prozesses ist der maßgebliche Differentialgleichungskoeffizient des Prozesses. Der nächste Eintrag ist die Lösung zur Differentialgleichung für eine beliebige Anregungsfunktion. Dabei ist $R(\tau)$ oder $R(t_1, t_2)$ die Kovarianzfunktion von folgendem Prozess, gegeben durch

$$R(t_1, t_2) = \langle p(t_1)p(t_2) \rangle . \tag{4.1-2}$$

wobei $p(t)$ der Wert des Prozesses zum Zeitpunkt t ist und die Spitzklammern die Erwartungswerte aller Realisierungen des Prozesses darstellen. Man spricht von einer stationären Funktion, wenn die Kovarianzfunktion nur von $t_1 - t_2$ abhängt. Dann kann man die Kovarianz als Funktion von $\tau = t_1 - t_2$ ausdrücken. Die gegebenen Eintragungen sind aus der Annahme abgeleitet, dass die Anregungsfunktion $\omega(t)$ weißes Rauschen ist mit einer spektralen Leistungsdichte, (Power Spectral Density, PSD) von $\Phi\alpha$, wobei α gleich ω für weißes Rauschen, r für den *random walk* Prozess und i für den *integrated random walk* Prozess ist. (Kapitel 4.1.2 - 4.1.4). Die PSD-Funktion für einen stationären Prozess ist gegeben durch

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R(\tau)e^{-i2\pi f\tau} d\tau , \tag{4.1-3}$$

worin f die Frequenz in Schwingungen pro Zeiteinheit ist. $\sigma_y^2(\tau)$ ist die Zwei-Stichproben Allan Varianz zur Stichprobenzeit τ definiert durch (Vessot, 1976)

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{\langle p^2(t + \tau) - 2p(t + \tau)p(t) + p^2(t) \rangle}{\tau^2} . \tag{4.1-4}$$

Für alle hier angeführten stochastischen Prozesse gilt, dass $\sigma_y^2(\tau)$ nur eine Funktion von τ ist, dem Zeitintervall zwischen den einzelnen Stichproben und nicht von den Zeitpunkten an denen die Stichproben genommen wurden. $\sigma_T^2(T)$ ist der Schätzwert der Varianz des Prozesses über die Zeit T und ist gegeben durch (Herring et al., 1990)

$$\sigma_T^2 = \left\langle \frac{1}{T} \int_0^T p^2(t+u) du \right\rangle . \quad (4.1-5)$$

$D(t,\tau)$ oder $D(\tau)$ ist die Strukturfunktion im Zeitbereich:

$$D(t,\tau) = \langle (p(t+u+\tau) - p(t+u))^2 \rangle . \quad (4.1-6)$$

4.1.1 Modellierung des Messfehlers mittels weißen Rauschens

VLBI2010 hat sich zum Ziel gesetzt, den instrumentellen Fehler der VLBI-Messung zu reduzieren (Kapitel 3.2). Für das zukünftige VLBI-System wird ein Fehler von durchschnittlich 4 ps erwartet. Daher hat das V2C sich dazu entschlossen, den instrumentellen Fehler mit einem weißen Rauschen von 4 ps für die Simulationen des VLB2010-Systems zu simulieren. Die stochastische Charakteristik des weißen Rauschens $p_\omega(t)$ ist wie folgt gegeben:

$$p_\omega(t) = \omega(t) , \quad (4.1-7)$$

$$p_\omega(t + \Delta t) = \omega(t + \Delta t) . \quad (4.1-8)$$

Somit ergibt sich die Kovarianzfunktion des weißen Rauschens zu

$$R(\tau) = \Phi_\omega \delta(\tau) , \quad (4.1-9)$$

die PSD kann ausgedrückt werden als

$$S(f) = \Phi_\omega . \quad (4.1-10)$$

Die Zwei-Stichproben Allan Varianz zur Stichprobenzeit τ ist folglich

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{3\Phi_\omega}{\tau^2} , \quad (4.1-11)$$

der Schätzwert der Varianz des Prozesses über die Zeit T ist

$$\sigma_T^2(T) = \Phi_\omega \delta(0) , \quad (4.1-12)$$

und die Strukturfunktion kann als

$$D(T) = 2\Phi_{\omega}\delta(0) \quad (4.1-13)$$

angegeben werden (Herring et al., 1990).

4.1.2 Simulation der VLBI-Stationsuhren

Um die VLBI-Stationsuhr simulieren zu können, muss man die stochastischen Eigenschaften der Uhren genauestens untersuchen. In dieser Arbeit wurden die Ergebnisse von Herring et al. (1999) über die Charakteristik des Rauschens eines Frequenzstandards, wie Wasserstoff-Maser, als Grundlage verwendet. Nach Vessot (1976) kann man Wasserstoff-Maser meist mit einer zusammengesetzten Funktion darstellen und die stochastischen Eigenschaften mit der *Allan Standard Deviation* (ASD), welche die Quadratwurzel der Allan Varianz ist, beschreiben. Das typische Verhalten eines Wasserstoff-Masers kann mit einem *random walk* und einem *integrated random walk* am besten dargestellt werden. Die Abb. 4-5 zeigt die Aufzeichnungen von verschiedenen Wasserstoff-Masern und die Modellierung mit *random walk plus integrated random walk* (Herring et al., 1990).

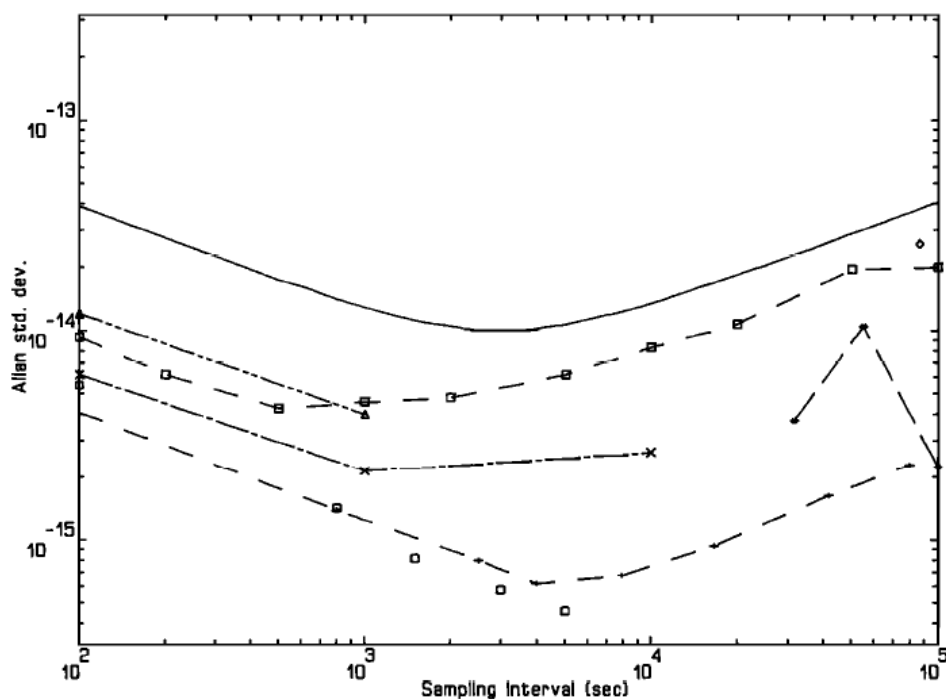


Abb. 4-5: Log-log Darstellung der typischen *Allan Standard Deviations* (ASD) von verschiedenen Wasserstoff-Masern als Funktion des Sampling Intervalls. Kreise: VLG-11 Serie (Vessot et al., 1986), Sterne: langperiodisches Verhalten der VLG-11 Serie (Vessot et al., 1986), Plus: VLG-10 Serie (Vessot, 1981), Kreuze: NR Serie (ca. 1980) (Reinhard und Rueger, 1980), Raute: langperiodisches Verhalten der NR Serie verglichen mit UTC-USNO (Allan und Pepler, 1999), Dreiecke: VLG-10 Serie (ca. 1979) Toleranztest für das Onsala Space Observatory (A.E.E Rogers, 1988), Rechtecke: EFO S4 und EFO S5 Maser (Ambrosini, 1988). Die durchgehende Linie beschreibt ein Modell mit $ASD \sim 10^{-14}$ @ 50 min der zusammengesetzten Funktionen *random walk plus integrated random walk*. (Grafik aus Herring et al., 1990)

Der stochastische Prozess des *random walk* kann folgend angeschrieben werden

$$\frac{dp_r(t)}{dt} = \omega(t) , \quad (4.1-14)$$

$$p_r(t + \Delta t) = p_r(t) + \int_0^{\Delta t} \omega(u + t) du . \quad (4.1-15)$$

Die Kovarianzfunktion des *random walk* Prozesses ist definiert als

$$R(t_1, t_2) = \Phi_r \min(t_1, t_2) . \quad (4.1-16)$$

Die PSD-Funktion für einen stationären Prozess $S(f)$ ist für den *random walk* Prozess nicht definiert.

Die Zwei-Stichproben Allan Varianz zur Stichprobenzeit τ ist folglich

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{\Phi_r}{\tau} , \quad (4.1-17)$$

der Schätzwert der Varianz des Prozesses über die Zeit T ist gegeben durch

$$\sigma_T^2(T) = \frac{\Phi_r}{(2T)} . \quad (4.1-18)$$

die Strukturfunktion des *random walk* Prozesses ist also

$$D(r) = \Phi_r \tau \quad (4.1-19)$$

und des *integrated random walk* folglich:

$$\frac{d^2 p_r(t)}{dt^2} = \omega(t) , \quad (4.1-20)$$

$$p_i(t + \Delta t) = p_i(t) + \Delta t \dot{p}_i(t) + \int_0^{\Delta t} (\Delta t - u) \omega(u + t) du , \quad (4.1-21)$$

$$\dot{p}_i(t + \Delta t) = \dot{p}_i(t) + \int_0^{\Delta t} \omega(u + t) du , \quad (4.1-22)$$

Die Kovarianzfunktion des *integrated random walk* Prozesses lässt sich anschreiben als

$$R(t_1, t_2) = \frac{\Phi_i \tau_i^2 (3t_2 - t_1)}{6} . \quad (4.1-23)$$

Die PSD-Funktion für einen stationären Prozess $S(f)$ ist auch für den *integrated random walk* Prozess nicht definiert.

Die Zwei-Stichproben Allan Varianz zur Stichprobenzeit τ ist folglich

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{\Phi_i \tau}{3} , \quad (4.1-24)$$

der Schätzwert der Varianz des *integrated random walk* über die Zeit T

$$\sigma_T^2(T) = \frac{\Phi_i T^3}{12} . \quad (4.1-25)$$

Die Strukturfunktion des *integrated random walk* ergibt sich somit zu

$$D(i, \tau) = \Phi_i \left(\frac{\tau^3}{3} + r_i^2 \right) \quad (4.1-26)$$

(Herring et al., 1990).

4.1.3 Simulation der Atmosphäre mit einem *random walk* Prozess

Das sehr vereinfacht modellierte Verhalten der Atmosphäre mittels *random walk* basiert auf den Untersuchungen von Herring et al. (1990). Dabei wird das stochastische Modell der atmosphärischen Laufzeitverzögerung im Wesentlichen durch das des feuchten Anteils in Zenitrichtung dargestellt. Der Fehler, der durch die Vernachlässigung des trockenen (hydrostatischen) Anteils der Atmosphäre entsteht, ist < 10 ps (~ 3 mm), wie die Analyse der Daten von Radiosonden zeigt. Eine gründliche Untersuchung der statistischen Eigenschaften und Variationen des Anteils des Wasserdampfes unter der Annahme des Kolmogorov Turbulenzmodells wurde von Treuhaft und Lanyi (1987) durchgeführt.

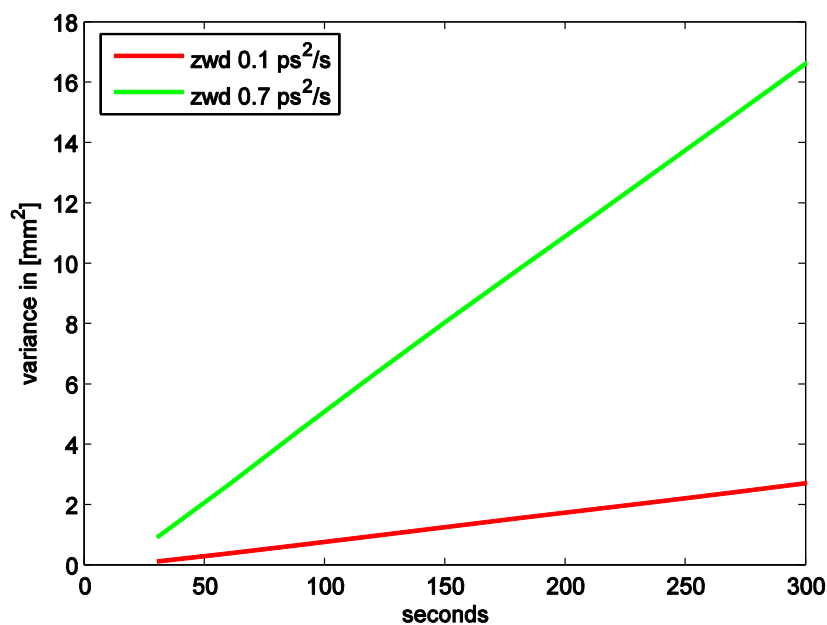


Abb. 4-6: Strukturfunktion für einen *random walk* mit einer PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ (rot) und von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ (grün).

In ihrer Arbeit vergleichen sie das stochastische Modell für Schwankungen der Laufzeitverzögerung mit Studien, die auf Beobachtungen basieren. In Abb. 4-6 ist die Strukturfunktion für den ZWD simuliert mit einem *random walk* abgebildet. Die PSD des *random walk* beträgt dabei $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ und $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$. Diese PSD wird auch für die ersten Simulationen mit dem MCS zur Erzeugung der ZWD im Kapitel 5.1 verwendet.

Nach Herring et al. variiert das *power law* für die ZWD-Funktion zwischen $5/3$ und $2/3$, während ein *random walk* Prozess einem konstanten *power law index* von 1 unterliegt. Trotzdem ist der *random walk* Prozess sehr gut geeignet, um die Schwankungen der feuchten Laufzeitverzögerung zu modellieren (Herring et al., 1990).

Der stochastische *random walk* Prozess ist in den Gleichungen (4.1-14) bis (4.1-19) beschrieben.

4.1.4 Simulation der Atmosphäre durch ein Turbulenzmodell

Das Turbulenzmodell, das im Folgenden diskutiert wird, basiert auf der Arbeit von Tobias Nilsson (Onsala Space Observatory, Schweden). Die hier vorgestellte theoretische Herleitung für die Simulation von ZWD mit einem Turbulenzmodell ist ein Auszug aus Nilsson et al. (2007). Die Grundlage dafür wiederum liefern die Erkenntnisse von Treuhaft und Lanyi (1987), welche auf der Kolmogorov Turbulenztheorie aufbauen (Tatarskii, 1971).

Mann kann die schiefe feuchte Laufzeitverzögerung l_i in Richtung r_i zur Zeit t_i folgendermaßen darstellen

$$l_i = \int_{S_i} (n_w(\mathbf{r}_i(z), t_i) - 1) ds_i \quad (4.1-27)$$

Dabei ist S_i der schiefe Weg, n_w der feuchte Anteil des Brechungsindex und z die Höhe. Zur Vereinfachung kann man alle feuchten Laufzeitverzögerungen in die Zenitrichtung reduzieren. Danach folgt die Einführung der äquivalenten feuchten Laufzeitverzögerung, *equivalent zenith wet delay* (EZWD), l_i^z zu

$$l_i^z = \int_0^\infty (n_w(\mathbf{r}_i(z), t_i) - 1) dz = \frac{l_i}{m_i} . \quad (4.1-28)$$

Hier ist m die Projektionsfunktion, *mapping function*.

Um nun verschiedene EZWDs zu simulieren, startet man mit einer a priori Laufzeitverzögerung in einer beliebigen Richtung zur Zeitepoche t_0 . Dann kann man die Elemente (i,j) der Kovarianzmatrix C für die Beobachtungen i und j wie folgt berechnen

$$\begin{aligned} [C]_{i,j} &= \langle (l_i^z - l_0^z)(l_j^z - l_0^z) \rangle = \langle \iint [n_i(z) - n_0(z)][n_i(z') - n_0(z')] dz dz' \rangle \\ &= \frac{1}{2} \iint \left[\langle (n_i(z) - n_0(z'))^2 \rangle + \langle (n_j(z) - n_0(z'))^2 \rangle - \langle (n_i(z) - n_j(z'))^2 \rangle \right. \\ &\quad \left. - \langle (n_0(z) - n_0(z'))^2 \rangle \right] dz dz' , \end{aligned} \quad (4.1-29)$$

wobei $\langle \dots \rangle$ für den Erwartungswert steht und die Notation $n_i(z) = n_w(\mathbf{r}_i(z), t_i)$ eingeführt wurde. Bei der Kenntnis über die Kovarianzmatrix C ist es möglich die simulierten EZWDs zu berechnen, indem man eine Reihe von Zufallszahlen basierend auf die Kovarianzmatrix C erzeugt und sie zu dem Anfangswert des EZWD addiert. Wenn die EZWDs durch eine Gaußsche Normalverteilung beschrieben werden, ist die Berechnung sehr einfach. Die Gaußsche Normalverteilung beschreibt nicht exakt das Verhalten von realen EZWDs, aber es ist eine sehr gute und in den häufigsten Fällen ausreichende Approximation. Da C eine symmetrische Matrix ist, kann sie zerlegt werden in

$$C = DD^T , \quad (4.1-30)$$

wobei T für eine transponierte Matrix steht. Diese Zerlegung kann beispielsweise durch eine Choleskyzerlegung (Press et al., 1992) realisiert werden. Dadurch ergibt sich der Vektor der simulierten EZWDs $\mathbf{l}^z = [l_1^z, l_2^z, \dots]^T$ wie folgt:

$$\mathbf{l}^z = \mathbf{l}_0^z + D\mathbf{x} . \tag{4.1-31}$$

Hier ist \mathbf{x} der Vektor von normalverteilten Zufallszahlen mit einem Mittelwert von 0 und einer Varianz von 1.

Hat man die EZWDs simuliert, so muss man sie jetzt vom Zenit in die Beobachtungsrichtung zurückrechnen. Dies geschieht mit Hilfe der Projektionsfunktion für feuchte Laufzeitverzögerung. Für die Projektionsfunktion wird der Refraktivitätsindex benötigt, der entlang des gesamten Strahlenweges bekannt sein muss, aber nicht bekannt ist. Für sehr hohe Elevationen ist der Fehler durch die Projektionsfunktion allerdings verschwindend klein und auch für niedrige Beobachtungen ist der Fehler zu vernachlässigen.

Im Weiteren nehmen wir an, dass die Variation in der feuchten Laufzeitverzögerung durch die Turbulenz in der Atmosphäre erzeugt wird. Die feuchte Laufzeitverzögerung in Beobachtungsrichtung wird in zwei Teile gespalten: in einen homogenen Anteil, der als konstant geschätzt wird, und einen turbulenten Anteil, der einer Variation unterliegt. Wenn der turbulente Anteil viel kleiner ist als der homogene Anteil, dann ist die Projektionsfunktion für die feuchte Laufzeitverzögerung in Beobachtungsrichtung der Projektionsfunktion für den homogenen Anteil sehr ähnlich. Folglich kann die Projektionsfunktion durch die des homogenen Anteils approximiert werden (Nilsson et al., 2007).

Um das Integral aus Gleichung (4.1-29) berechnen zu können, müssen die Korrelationen zwischen den Refraktivitäten an zwei verschiedenen Orten und/oder zu zwei verschiedenen Zeitpunkten bekannt sein. Diese Korrelationen können der Turbulenztheorie von Treuhart und Lany (1987) entnommen werden.

$$\langle (n_w(\mathbf{r}_i) - n_w(\mathbf{r}_j))^2 \rangle = C_n^2 \frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}} \tag{4.1-32}$$

C_n ist der Strukturparameter des Brechungsindex (*refractive index structure constant*, Tatarskii, 1971), und L ist die Sättigungslänge. Hier steht $\|\dots\|$ für die Norm $\|\mathbf{x}\| = \sqrt{\mathbf{x}^T \mathbf{x}}$. Gleichung (4.1-32) beschreibt nur die räumliche Korrelation zwischen zwei räumlich getrennten Orten zum selben Zeitpunkt. Zeitliche Variationen können mit Hilfe derselben Gleichung berechnet werden, indem man annimmt, dass die Luftmassen sich mit dem Wind bewegen (Nilsson et al., 2007). Verwendet man diesen Ansatz, so spricht man von *frozen atmosphere*, also einer eingefrorenen räumlichen Korrelation, die sich durch den Wind über unsere Beobachtungsstation bewegt.

Mit dieser Annahme (4.1-32) kann man nun beide, räumliche und zeitliche Korrelationen, wie folgt beschreiben

$$\langle (n_i - n_j)^2 \rangle = C_n^2 \frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j + \mathbf{v}\delta t_{ij}\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j + \mathbf{v}\delta t_{ij}\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}}, \quad (4.1-33)$$

wobei \mathbf{v} die Windgeschwindigkeit ist und $\delta t_{ij} = t_i - t_j$.
Folglich können wir Gleichung (4.1-29) schreiben als

$$[C]_{ij} = \frac{C_n^2}{2} \iint \left[\frac{\|\mathbf{r}_i(z) - \mathbf{r}_0(z') + \mathbf{v}\delta t_{i0}\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_i(z) - \mathbf{r}_0(z') + \mathbf{v}\delta t_{i0}\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}} + \frac{\|\mathbf{r}_j(z) - \mathbf{r}_0(z') + \mathbf{v}\delta t_{j0}\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_j(z) - \mathbf{r}_0(z') + \mathbf{v}\delta t_{j0}\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}} \right. \\ \left. - \frac{\|\mathbf{r}_i(z) - \mathbf{r}_j(z') + \mathbf{v}\delta t_{ij}\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_i(z) - \mathbf{r}_j(z') + \mathbf{v}\delta t_{ij}\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}} - \frac{\|\mathbf{r}_0(z) - \mathbf{r}_0(z')\|^{\frac{2}{3}}}{1 + \frac{\|\mathbf{r}_0(z) - \mathbf{r}_0(z')\|^{\frac{2}{3}}}{L^{\frac{2}{3}}}} \right] dz dz' . \quad (4.1-34)$$

Das Doppelintegral kann mittels numerischer Integration gelöst werden (Nilsson et al., 2007). Das Turbulenzmodell von Tobias Nilsson wurde für die VLBI2010 Simulation (Kapitel 5.2) verwendet und im Weiteren mit „Turbulenzmodell Onsala“ bezeichnet.

Die folgenden Eingangsparameter sind für das Onsala Turbulenzmodell erforderlich:

- *refractive index structure constant* C_n ,
- die effektive Höhe der feuchten Atmosphäre H ,
- Windrichtung und Windgeschwindigkeit (aus Wettermodellen des *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF)),
- die Korrelationsdistanz (3000 m),
- die zeitliche Korrelation von 2h, d.h. die ZWD-Werte sind zwei Stunden lang miteinander korreliert.

Abb. 4-7 zeigt die modellierten ZWD-Werte an der Station Wettzell (Deutschland) mit dem Onsala Turbulenzmodell. Für die Berechnung wurden folgende Parameter angenommen:

$$C_n = 0.94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3},$$

$$H = 1856 \text{ m}.$$

Die Parameter für die Turbulenzsimulationen für alle VLBI-Stationen, die in den VLBI2010-Testnetzwerken enthalten sind, sind für das Netzwerk mit 16 Stationen in Tab. 5.2-1 und für alle anderen Netzwerkgrößen in Anhang A zusammengefasst.

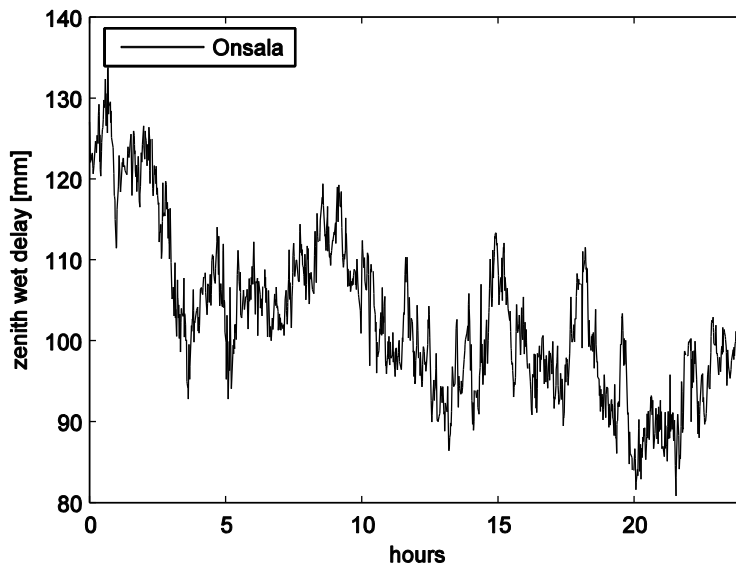


Abb. 4-7: Modelliertes ZWD für 24 Stunden an der Station Wettzell mit dem Onsala Turbulenzmodell.

Aufgrund der sehr langen Rechenzeit (für ein Netzwerk mit 16 Stationen mit rund 200 000 Beobachtungen braucht der Simulator mehr als 24 Stunden um die ZWD-Werte zu erzeugen) wurde das hier gezeigte Turbulenzmodell für weitere Simulationen adaptiert.

Das Turbulenzmodell Vienna unterscheidet sich im Wesentlichen nur dadurch, dass die Kovarianzmatrix für eine Simulation mit n -Wiederholungen nur einmal aufgestellt werden muss, und danach nur eine Änderung der Zufallszahlen für jede weitere Wiederholung folgt. Das hat den Vorteil einer sehr schnellen Berechnung eines Turbulenzmodells. Der Nachteil liegt darin, dass man dadurch keine zusammenhängenden Realisierungen erhält, sondern n einzelne Realisierungen. Das Vienna Turbulenzmodell betrachtet jede Wiederholung des MCS als erste Wiederholung und beginnt daher immer mit einem fixen Startwert, z.B. 150 mm. Folglich wird mit dem Vienna Turbulenzmodell keine kontinuierliche Zeitreihe von VLBI-Beobachtungen simuliert, sondern n einzelne Zeitserien. Der Vergleich mit echten Daten der Zeitserie CONT05 und der Vergleich zwischen Onsala und Vienna Turbulenzmodell zeigt, dass der Unterschied der verschiedenen Modellierungen vernachlässigbar klein ist (Kapitel 5.2).

$$C_n = 0.94 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$$

$$H = 1856 \text{ m};$$

$$\text{Windgeschwindigkeit Nord } v_n = 6.75 \text{ m/s};$$

$$\text{Windgeschwindigkeit Ost } v_e = 4.22 \text{ m/s};$$

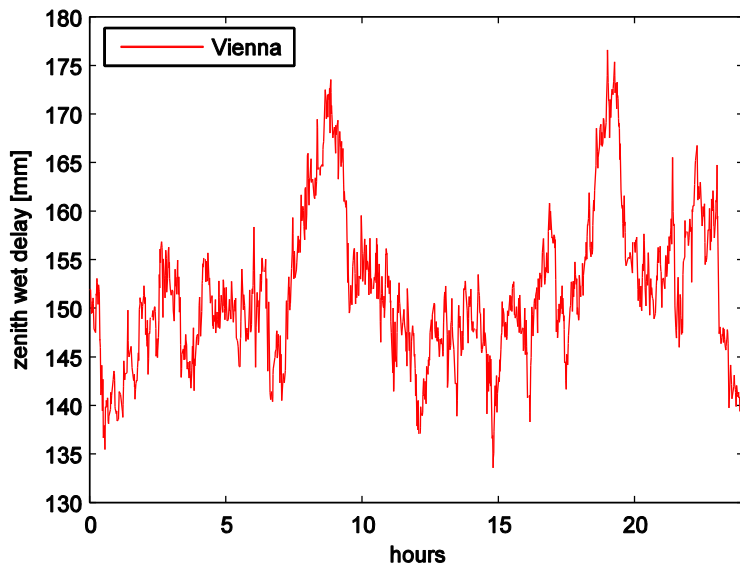


Abb. 4-8: Simuliertes ZWD für 24 Stunden an der Fundamentalstation Wettzell mit dem Vienna Turbulenzmodell.

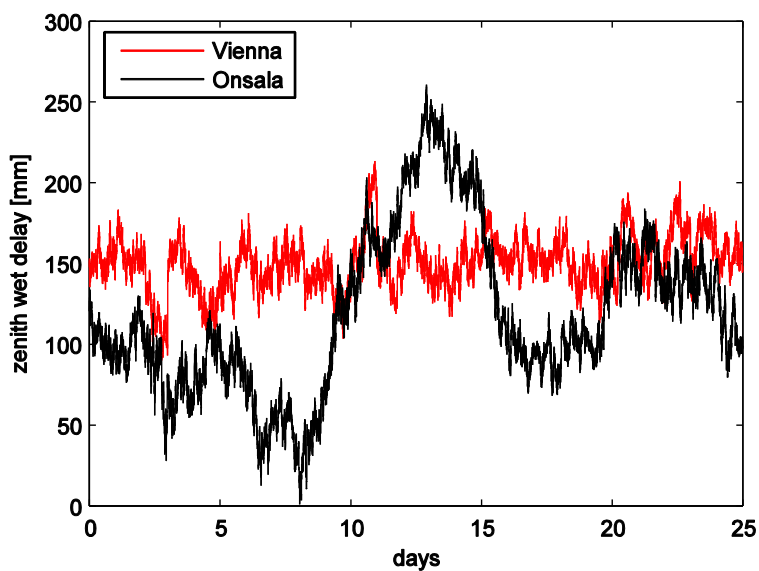


Abb. 4-9: Simuliertes ZWD für 25 Tage an der Fundamentalstation Wettzell in schwarz mit dem Onsala und in rot mit dem Vienna Turbulenzmodell.

4.2 Beobachtungsplanung

Anders als bei GPS-Beobachtungen wird in der VLBI zu einem Zeitpunkt nur eine Radioquelle von mehreren Stationen aus simultan beobachtet. Die Genauigkeit der Resultate einer VLBI-Kampagne sowie die Anzahl der Beobachtungen an jeder einzelnen VLBI-Beobachtungsstation sind direkt von der Auswahl der zu beobachtenden Radioquellen abhängig. Dies verlangt nach einer strikten und vorausschauenden Planung einer 24-Stunden VLBI-Kampagne.

4.2.1 Beobachtungsplanung mit dem Softwarepaket SKED

Der IVS erstellt jährlich einen Masterplan, der die gesamten VLBI-Beobachtungen des Jahres auflistet. Für verschiedenste Anwendungen und Netzwerke (Tab. 4.2-1) müssen 24-Stunden Beobachtungspläne, oder auch kurzzeitige sogenannte *Intensives*, erstellt werden. Dafür wird das Softwarepaket SKED (Vandenberg, 1999) verwendet.

Tab. 4.2-1: IVS-VLBI-Kampagnen, die im Masterplan enthalten sind (IVS *Observing Program Session Descriptions*: 2008, <http://ivs.nict.go.jp/mirror/program/descrip2008.html>)

| | |
|-------------------------------------|---|
| IVS-R1 & IVS-R4 | Zweimal wöchentliche Bereitstellung von EOP-Resultaten. Dabei stehen 1 und 4 für die Wochentage Montag und Donnerstag, an denen die Kampagne gestartet wird. Das R steht für <i>rapid turnaround</i> , also eine schnelle Bereitstellung der Ergebnisse. Das Ziel ist es, spätestens nach 15 Tagen die EOP-Resultate vorliegen zu haben. Dies wiederum kann nur durch einen schnellen Datentransfer durch rasches Versenden der Harddisks oder durch e-Transfer zu den Korrelatoren geschehen. Für die R1-, R4-Beobachtungen gibt es verschiedene Netzwerke mit jeweils 8 Stationen, die zyklisch beobachtet werden. Dabei gibt es für jeden Tag ein Kernnetzwerk, und nur 1 oder 2 Stationen, die gewechselt werden. R1 wird mit einer Datenrate von 256 Mbits/s und R4 mit 128 Mbits/s aufgezeichnet. |
| IVS-T2 | Liefert alle zwei Monate eine Überwachung des TRF. Wenigstens zweimal im Jahr nehmen alle geodätischen VLBI-Stationen an einer T2-Beobachtung teil. |
| IVS-INT1, IVS-INT2 & IVS_INT3 | Die einstündige intensive Beobachtung einer Basislinie liefert täglich einen UT1-Wert. INT1 beobachtet von Montag bis Freitag die Basislinie Wettzell – Kokee, INT2 Samstag und Sonntag die Basislinie Wettzell – Tsukuba und INT3 jeweils montags Wettzell – Tsukuba – NyAlesund. Der Datentransfer aller <i>Intensives</i> erfolgt über e-Transfer direkt zu dem Korrelator oder zu einem Knotenpunkt in der Nähe des Korrelators, der hier auf die Daten zugreifen kann. |
| APSG | Kontinuierliche Überwachung der Plattentektonik in der Asien-Pazifik Region. Die Kampagne beinhaltet Stationen auf allen vier angrenzenden Platten: Hobart und Parkes auf der australischen Platte, Tsukuba, Seshan und Urumqi an der eurasischen Platte und Kokee auf der pazifischen Platte. Gemeinsam mit den APSG-, SLR- und GPS-Kampagnen, die im gleichen Monat durchgeführt werden, liefern diese Beobachtungen genaueste Erkenntnisse über die Bewegungen in der Asien-Pazifik Region. |
| EUROPE | Ermitteln der Stationskoordinaten und deren Veränderungen der europäischen VLBI-Stationen. Diese Kampagne wird mit der höchst möglichen Genauigkeit durchgeführt. |

| | |
|--------------------------------|---|
| OHIGGINS | Das Ziel ist es, die südlichen Stationen optimal in den ITRF einzubinden. Die beteiligten Stationen sind: O'Higgins, Syowa, Fortaleza, Hartebeesthoek, Hobart, TIGO und Kokee Park. |
| RDV | Für das Jahr 2008 sind sechs <i>research and development VLBA</i> - (RDV) Kampagnen im Abstand von ungefähr zwei Monaten geplant. Das Beobachtungsnetz beinhaltet 10 VLBA-Stationen und bis zu 10 geodätische VLBI-Stationen. Die Versuche werden von verschiedenen Departements geleitet und für verschiedenste wissenschaftliche Aufgaben verwendet. Im Vordergrund stehen alle Untersuchungen die mit VLBI2010 verbunden sind. |
| IVS-CRF, IVS-CRFDS & IVS-CRFMS | Die CRF (<i>Celestial Reference Frame</i>), CRFDS (<i>deep south</i> , weit südlich) und CRFMS (<i>median south</i> , mittlerer Süden) dienen ausschließlich astrometrischen Beobachtungen, um den derzeitigen CRF zu verbessern und mit der Beobachtung „neuer“ Radioquellen zu verdichten und zu erweitern. Diese VLBI-Kampagne ist 19 mal für das Jahr 2008 geplant. |
| IVS-R&D | Die IVS-R&D-Kampagnen haben zwei Ziele, einerseits eine Datenrate von 512Mbits/s zu realisieren und andererseits Quellen mit einer sehr hohen Rotverschiebung zu beobachten, um die Anisotropie der Hubble Konstante besser bestimmen zu können und eine mögliche Reduktion des Effekts der Quellenstruktur zu untersuchen. Es sind zehn R&D-Kampagnen geplant. |

Die Unterschiedlichkeit der in Tab. 4.2-1 angeführten VLBI-Kampagnen stellt an das Programm zur Erstellung der Beobachtungspläne große Anforderungen und große Flexibilität. Das Programm SKED basiert auf Katalog-Dateien für Radioquellen und VLBI-Stationen, die die Charakteristik der Quellen und der VLBI-Stationen genauestens beschreiben. Das Programm selbst ermöglicht es dem Bediener, einen Beobachtungsplan für verschiedene Kriterien zu erstellen, indem er die Optimierungsparameter verändert. Diese Veränderung wirkt sich auf die Auswahl der als nächstes zu beobachtenden Quelle aus. Eine der Aufgabenstellung angepasste Quelle muss vom Benutzer als erste Beobachtung vorgegeben werden. Danach folgt ein dynamischer Optimierungsprozess, der mathematisch den Erkenntnissen der Optimierung geodätischer Netze folgt. Nach Koch (1976) ist der Ermittlungszyklus ein Markoff-Prozess. Der exakte mathematische Algorithmus zur automatischen Optimierung eines VLBI-Beobachtungsplanes ist in Steufmehl (Dissertation: Optimierung von Beobachtungsplänen in der Langbasisinterferometrie (VLBI), 1994) diskutiert.

Für die VLBI2010-Simulationen müssen die Katalog-Dateien der VLBI-Stationen um die virtuellen noch nicht existierenden Stationen erweitert werden, um Beobachtungspläne erstellen zu können. Auch die Quellenkataloge werden erneuert, und verschiedene Anzahlen sowie verschiedene Kategorien von Quellen getestet (Petrov, 2007). Die Beobachtungspläne werden im Hinblick auf Anzahl der Beobachtungen pro 24-Stunden optimiert. Diese Optimierung hängt von drei Faktoren ab (Behrend et al., 2007):

- Verkürzung der Zeit zwischen zwei Beobachtungen, also der Wegzeit der Antenne von Radioquelle zu Radioquelle,
- Verkürzung der Beobachtungszeit der Quelle,
- Verbesserung des Optimierungsalgorithmus des Programms SKED.

Um VLBI2010-Beobachtungspläne zu erstellen, hat John Gipson (NVI, Inc./NASA GSFC, USA) die erforderlichen Änderungen an SKED vorgenommen und alle mit SKED erzeugten Beobachtungspläne für das VLBI2010 -Komitee erzeugt.

Der Zusammenhang zwischen der Änderung der Optimierungsstrategie, Änderung der Antennenparameter, Änderung der Radioquellenkataloge und der daraus resultierenden Anzahl der Beobachtungen ist in Abb. 4-10 dargestellt. Grundlage für diese Untersuchung ist ein Netzwerk mit 16 identischen 12 m Antennen. Die in der Grafik verwendeten Abkürzungen für verschiedene Optimierungsszenarien sind in Tab. 4.2-2 erklärt.

Die Grafik zeigt, dass sich mit den derzeit verwendeten Standardstrategien in SKED nur durch eine Erhöhung der azimutalen Drehgeschwindigkeiten (*AZ slew rates*) der VLBI-Antennen noch keine große Steigerung der Anzahl der Beobachtungen erreichen lässt. Ändert man jedoch die Strategie und den Radioquellenkatalog, kann man eine Zunahme der Beobachtungen mit schnelleren Antennen deutlich sehen (grüne Kurve, NM-NL-NS). Um von den VLBI2010-Antennen profitieren zu können, muss eine weitere Optimierung für das Programm SKED untersucht werden oder sogar der mathematische Algorithmus grundlegend geändert werden.

Tab. 4.2-2: Erläuterung der Optimierungsstrategien des Programmes SKED zu Abb. 4-10

| | |
|-------|---|
| OM | Herkömmliche Art: Standardbeobachtung, bei der die Daten so aufgezeichnet werden wie sie empfangen werden |
| NM | Neue Art: <i>burst mode</i> , dabei werden die Daten der Beobachtungen gepuffert und danach auf die Harddisk geschrieben, während sich die Antenne zur Beobachtung der nächsten quelle ausrichtet |
| OL | Klassischer geodätischer Radioquellenkatalog |
| NL | Neuer Radioquellenkatalog (230 Radioquellen) |
| OS | Standardoptimierung für den Beobachtungsplan |
| NS | Neuer Optimierungsansatz für den Beobachtungsplan |
| RDV42 | Ein im Dezember 2003 durchgeführtes VLBI-Experiment mit 10 VLBA-Stationen (Drehgeschwindigkeit der VLBA-Antennen 1.5 °/s) und 9 VLBI-Antennen mit unterschiedlichen Drehgeschwindigkeiten |

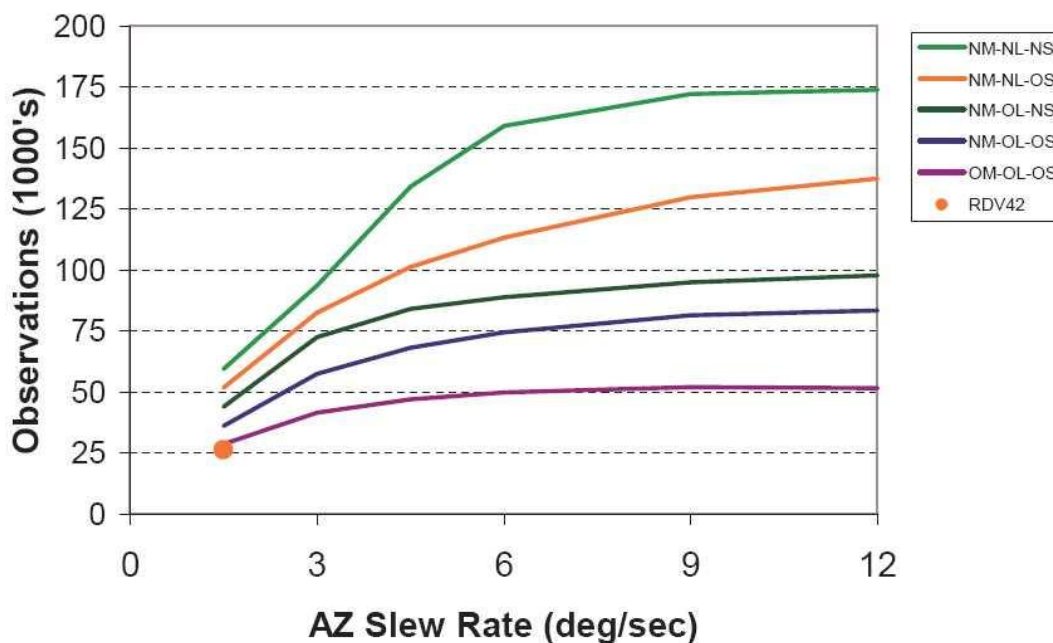


Abb. 4-10: Grafik von J. Gipson aus Behrend et al. (2007)

Durch den angewandten Algorithmus in SKED kann sich eine sehr inhomogene räumliche Radioquellenverteilung in einem Zeitabschnitt < 10 Minuten über einer Station ergeben. Für die Analyse der VLBI-Beobachtungen ist es aber erstrebenswert, eine möglichst gleichmäßige Radioquellenverteilung innerhalb eines Beobachtungszeitraums < 10 Minuten an jeder Beobachtungsstation zu haben. Um eine sehr gleichmäßige Verteilung über einen sehr kurzen Zeitraum < 10 Minuten zu gewährleisten, muss die Planungsstrategie einer VLBI-Kampagne und folglich der Optimierungsalgorithmus in SKED geändert werden.

4.2.2 Beobachtungsplanung mit gleichmäßiger Quellenverteilung, *uniform sky*

Am NRC (*National Research Canada*) wurde eine weitere Strategie zur Erzeugung von Beobachtungsplänen entwickelt. Diese optimiert den Beobachtungsplan ausschließlich auf gleichmäßige Quellenverteilung über kurze Zeitintervalle. Diese Beobachtungspläne dienen zur Untersuchung der Einflüsse der Beobachtungsdichte auf die Genauigkeit der VLBI-Parameter. Folgende Kriterien sind für einen *uniform sky* Beobachtungsplan maßgebend:

- Festgelegte Beobachtungsintervalle: die Intervalllänge ist konstant über 24 Stunden und gilt für jede Beobachtung.
- Verwenden von Quellenpaaren: zwei gegenüberliegende Quellen ($\sim 180^\circ$) werden zum gleichen Zeitpunkt beobachtet. Das führt dazu, dass man paarweise Scans bekommt, in denen im optimalen Fall eine Hälfte der VLBI-Antennen die eine Quelle beobachten, während die übrigen VLBI-Antennen die Radioquelle in der gegenüberliegenden Hemisphäre beobachten.
- *uniform sky* über kurzen Beobachtungszeitraum: um eine gleichmäßige Quellenverteilung über den einzelnen VLBI-Stationen zu garantieren, müssen die gewählten Radioquellen an der Himmelskugel in einem bestimmten Intervall gleichmäßig verteilt sein. Gleichmäßige Verteilung an der Himmelskugel kann erzielt werden, wenn die nächste zu beobachtende Quelle immer aus dem Bereich des größten „Loches“ in der gleichmäßigen Verteilung gewählt wird.
- Gleiche Anzahl der Quellenbeobachtungen: jede Quelle wird über den Zeitraum eines VLBI-Experiments annähernd gleich oft beobachtet um eine adäquate *UV-coverage* zu garantieren. Damit können Quellenstrukturkorrekturen mit Hilfen von Quellenbilder (*source imaging*) ermöglicht werden.

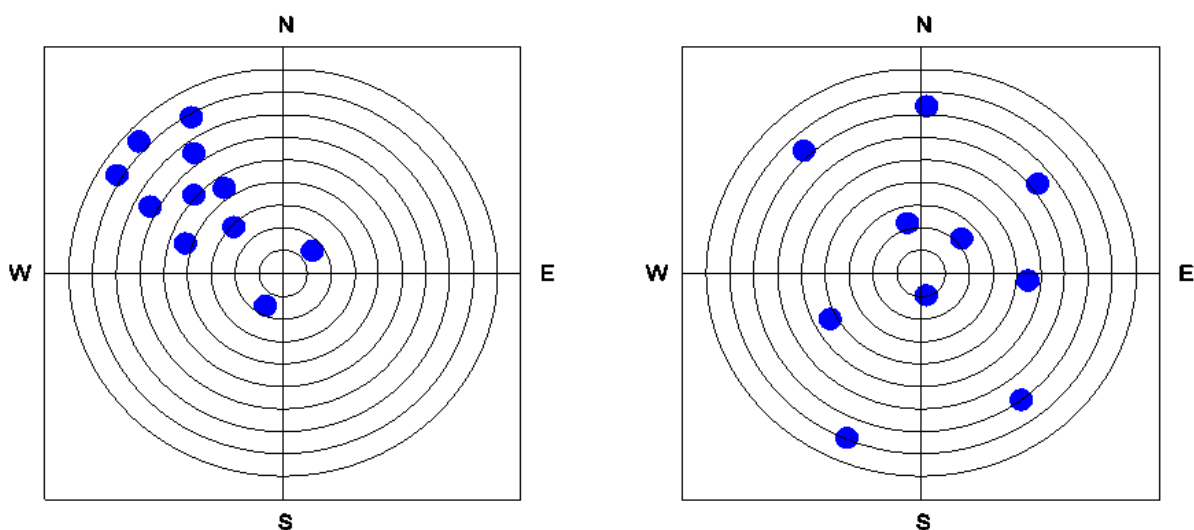


Abb. 4-11: Links ist der mit SKED generierte Beobachtungsplan mit der Beobachtungsstrategie NM-NL-NS und rechts ist der *uniform sky* Beobachtungsplan abgebildet.

Die *uniform sky* Beobachtungspläne wurden nicht unter Berücksichtigung von Antennendrehgeschwindigkeiten erzeugt. Einzig die Verkürzung der Beobachtungsintervalle war bei dieser Untersuchung von Bedeutung. Die erforderlichen Drehgeschwindigkeiten, die benötigt werden, um die festgelegten Beobachtungsintervalle auch tatsächlich zu ermöglichen, können für jedes Beobachtungsintervall berechnet werden. In den folgenden Untersuchungen wurden Beobachtungsintervalle von 15, 30, 45, 60, 90, 120, 240 und 360 s verwendet. Um VLBI-Beobachtungen in einem Netzwerk mit 16 Stationen und der *uniform sky* Strategie mit einem Intervall von 15 s realisieren zu können, benötigt man Antennen mit einer Drehgeschwindigkeit von 32 °/s in Azimut und 8 °/s in Elevation (Tab. 4.2-3).

Tab. 4.2-3: *Uniform sky* Beobachtungspläne, Anzahl der Beobachtungen und erforderliche Antennendrehgeschwindigkeiten in Azimut (az) und Elevation (el).

| Station | Beobachtungsintervall [s] | <i>uniform coverage</i> [min] | Drehgeschwindigkeit | | Beschleunigung [°/s ²] | Anz. d. Beob. |
|---------|---------------------------|-------------------------------|---------------------|----------|------------------------------------|---------------|
| | | | az [°/s] | el [°/s] | | |
| 16 | 15 | 3 | 32.0 | 8.0 | 8.0 | 278 830 |
| 16 | 30 | 6 | 12.0 | 3.2 | 3.0 | 139 564 |
| 16 | 45 | 9 | 7.3 | 1.8 | 1.3 | 93 231 |
| 16 | 60 | 12 | 4.8 | 1.1 | 1.3 | 69 708 |
| 16 | 90 | 12 | 3.2 | 0.8 | 1.3 | 46 244 |
| 16 | 120 | 12 | 2.1 | 0.6 | 1.3 | 34 806 |
| 16 | 240 | 24 | 1.0 | 0.3 | 1.3 | 17 561 |
| 16 | 360 | 36 | 0.7 | 0.2 | 1.3 | 11 412 |

Kapitel 6.2 vergleicht die verschiedenen Strategien zur Erzeugung von VLBI-Beobachtungsplänen mit dem MCS unter dem Blickpunkt der optimalen Antennendrehgeschwindigkeit. In Abb. 4-11 ist ein *sky plot* über der Station Fortaleza gezeigt, um zu veranschaulichen, wie unterschiedlich die Quellenverteilung bei von SKED generierten und *uniform sky* Beobachtungsplänen im Extremfall sein können. Der betrachtete Zeitabschnitt über der Station FORTALEZA beträgt 6 Minuten. Links ist der mit SKED generierte Beobachtungsplan mit der Strategie NM-NL-NS und rechts ist der *uniform sky* Beobachtungsplan abgebildet.

4.3 VLBI-Auswertung mit dem Softwarepaket OCCAM 6.2 SIM

Die Analysesoftware OCCAM (Titov et al., 2004)

Für die Analyse der simulierten Daten wurde das Softwarepaket OCCAM 6.2 SIM verwendet. Das VLBI-Analyseprogramm besteht aus fünf Programmsequenzen.

- *dtau0 (data handling)*: Liest die Daten aus einem NGS-File ein und erzeugt binäre Dateien für die weitere Berechnung in OCCAM. Die Datenstruktur basiert auf Basislinienbeobachtungen, d.h. für jede Basislinienbeobachtung wird ein Datensatz angelegt. Diese Struktur führt allerdings dazu, dass sehr viele Informationen, die stationsabhängig sind, in einem Scan (alle Beobachtungen einer Radioquelle von allen in einem bestimmten Zeitfenster, Scanlänge, möglichen VLBI-Antennen) mehrfach gespeichert werden.
- *pn (precession and nutation)*: Transformiert die Position der Quasare zwischen J2000.0 CRF (Celestial Reference Frame) und der Position zum Beobachtungszeitpunkt. EOP und Ephemeriden für Sonne, Erde und Mond werden von einem externen Datenfile gelesen und für die Beobachtungsepochen interpoliert. Diese Daten werden in einem binären Datenfile gespeichert.
- *station (station corrections and derivatives)*: Schreibt die folgenden Daten in ein in *dtau0* erzeugtes binäres Datenfile, a) Korrektur der Stationskoordinaten aufgrund Erdzeiten; b) Korrekturen aufgrund Antennendeformationen, ozeanischer Auflasteffekte, atmosphärischer Auflasteffekte, Schnee Auflasteffekte, hydrologischer Auflasteffekte und nicht zeitenbedingter ozeanischer Auflasteffekte sowie säkularer Polzeiten; c) Antennenachsenoffset; d) troposphärische Modelle, *mapping functions*, a priori hydrostatische Gradienten; e) lokale Quellenkoordinaten, Azimut, Elevation, Stundenwinkel; f) partielle Ableitung der Laufzeitverzögerung in Bezug auf die Beobachtungsstation, Quellenkoordinaten, Nutationsparametern und EOP.
- *geomet (geometric model)*: Berechnet die theoretischen Laufzeitverzögerungen und Laufzeitverzögerungsraten für jede Beobachtung. Es berücksichtigt die geometrische Konfiguration der Antennen und alle relativistischen Effekte. Diese Informationen werden in einem binären Datenfile gespeichert.
- *lsm oder kalman*: Parameterschätzung

Die Modelle, die in den jeweiligen Programmen, *pn*, *station* und *geomet* zur Auswahl stehen, sind in Titov et al. (2004), OCCAM 6.0 User's Guide oder in Heinkelmann (2008, Dissertation) genau beschrieben.

4.3.1 Gauß-Markov Least Squares Method (LSM)

Das Gauß-Markov kleinste Quadrate Modell (LSM) ist in OCCAM 6.0 implementiert und wird am IGG als Standardlösung für VLBI-Auswertungen verwendet. Das LSM Modell schätzt die Parameter unter einer Minimierung der quadratischen Verbesserungen.

Der Vektor der Verbesserungen der Beobachtungen \mathbf{v} ergibt sich aus der Designmatrix A , dem Vektor der Unbekannten \mathbf{x} und dem verkürzten Beobachtungsvektor \mathbf{l} . Der verkürzte Beobachtungsvektor \mathbf{l} wird in der VLBI auch als $o - c$ (*observed - computed*) bezeichnet und wird mit einem MCS nach Gleichung (4.1-1) synthetisch erzeugt.

$$\mathbf{v} = A \cdot \mathbf{x} - \mathbf{l} \quad (4.3-1)$$

Die Normalgleichung ergibt sich aus der Normalgleichungsmatrix N , der Designmatrix A und der Gewichtsmatrix P :

$$N\mathbf{x} - A^T P \mathbf{l} = A^T P A \mathbf{x} - A^T P \mathbf{l} = 0 \quad (4.3-2)$$

Die Lösung nach den Unbekannten \mathbf{x} folgt schließlich zu

$$\mathbf{x} = N^{-1} A^T P \mathbf{l} \quad (4.3-3)$$

Die Kofaktormatrix ergibt sich zu

$$Q_{xx} = \sigma_0^2 \cdot N^{-1} \quad (4.3-4)$$

der a posteriori Varianzfaktor σ_0^2 ist die gewichtete Quadratsumme der Verbesserungen durch die Anzahl der Beobachtungen weniger Unbekannten.

$$\sigma_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T P \mathbf{v}}{n - u} \quad (4.3-5)$$

Die Korrelationen ergeben sich zu

$$k_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sqrt{q_{ii}^2 + q_{jj}^2}} \quad (4.3-6)$$

In der Version 6.0, auf der OCCAM 6.2 SIM basiert, gibt es für die Gauß-Markov LSM-Lösung eine Limitierung von 20 VLBI-Stationen, 400 Radioquellen und 5 000 Scans. Diese Limits wurden zwar in der Version OCCAM 6.2 SIM aufgehoben, aber aufgrund der extrem hohen Anzahl an Beobachtungen der VLBI2010-Beobachtungspläne (bis zu 280 000 Beobachtungen), erhält man auch extrem große Normalgleichungsmatrizen. Das Gauß-Markov Modell konnte nicht verwendet werden, ohne eine Änderung der gesamten Programmarchitektur von OCCAM durchzuführen, weshalb für die Simulationen das Kalman Filter verwendet wurde.

4.3.2 Kalman Filter

Im Jahr 1960 publizierte R.E. Kalman seinen berühmten Artikel, in dem er eine rekursive Lösung für das lineare Filtern von diskreten Daten beschrieb. Größtenteils unterstützt durch die Vorteile digitaler Berechnungen wurde das Kalman Filter seitdem Gegenstand intensiver Forschungen und Anwendungen, im Speziellen in dem Gebiet der selbstständigen und unterstützten Navigation (Welch et al., 2006).

Das Kalman Filter ist ein Satz von mathematischen Gleichungen, der effizient rechenbetont (rekursiv) Mittelwerte zur Schätzung des Zustandes eines Prozesses, unter Minimierung der Summe der quadratischen Fehler, ermittelt. Der Filter ist in verschiedener Hinsicht sehr effektiv: er unterstützt Schätzungen in der Vergangenheit, in der Gegenwart und sogar zukünftiger Ereignisse, auch wenn die exakten Eigenschaften des modellierten Systems nicht bekannt sind (Welch et al., 2006).

Das Kalman Filter basiert auf einem Kovarianzfortpflanzungsfilter wie er in Gelb (1974) beschrieben ist. Das Filter wird mit den Startwerten \mathbf{x}_0 und der Kovarianzmatrix C_0 initialisiert. Das mathematische Modell zur Beschreibung der Realität ist in der Zustandsübergangsmatrix A (*state transition matrix*) enthalten. Das Systemrauschen (*system noise*) in Matrix C gibt Auskunft über die Qualität, in der das mathematische Modell in Matrix A die Realität darstellt. Der schematische Ablauf des Filter Systems ist in Abb. 4-2 dargestellt.

$$\mathbf{x}_{k-1} = \mathbf{x}_0 \tag{4.3-7}$$

$$P_{k-1} = C_0 \tag{4.3-8}$$

Der Filteralgorithmus startet nach der Initialisierung. Die folgenden Gleichungen kann man in Zeitupdate, prädizierende Gleichungen, und Messungsupdate, korrigierende Gleichungen, unterteilen.

Zeitupdate:

$$\mathbf{x}_k^- = A\mathbf{x}_{k-1} \tag{4.3-9}$$

$$P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \tag{4.3-10}$$

Mit dem Systemstatusvektor \mathbf{x}_{k-1} zur Epoche t_{k-1} , der dazugehörigen Kovarianzmatrix P_{k-1} , und der Matrix A und Q , kann der Systemstatusvektor \mathbf{x}_k^- und die dazugehörige Kovarianzmatrix P_k^- zur Zeitepoche t_k prädiziert werden. Der Beobachtungsvektor \mathbf{z}_k zur Epoche t_k und die Designmatrix H_k verbinden \mathbf{z}_k und den Systemstatusvektor, um den prädizierten Zustand zu korrigieren. Der korrigierte Systemstatusvektor \mathbf{x}_k^+ und die dazugehörige korrigierte Kovarianzmatrix P_k^+ sind schließlich die Schätzwerte des Filters zur Zeitepoche t_k . Die Ergebnisse werden dazu verwendet um den Systemstatusvektor der nächsten Zeitepoche zu prädizieren. Diese Vorgangsweise wird in einer Schleife so oft wiederholt, bis alle Messungen berücksichtigt wurden (Pany et al., 2008).

Update der Messungen:

$$K_k = P_k^- H_k^T (H_k P_k^- H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4.3-11)$$

$$\mathbf{x}_k^+ = \mathbf{x}_k^- + K_k (\mathbf{z}_k - H_k \mathbf{x}_k^-) \quad (4.3-12)$$

$$P_k^+ = P_k^- - K_k H_k P_k^- \quad (4.3-13)$$

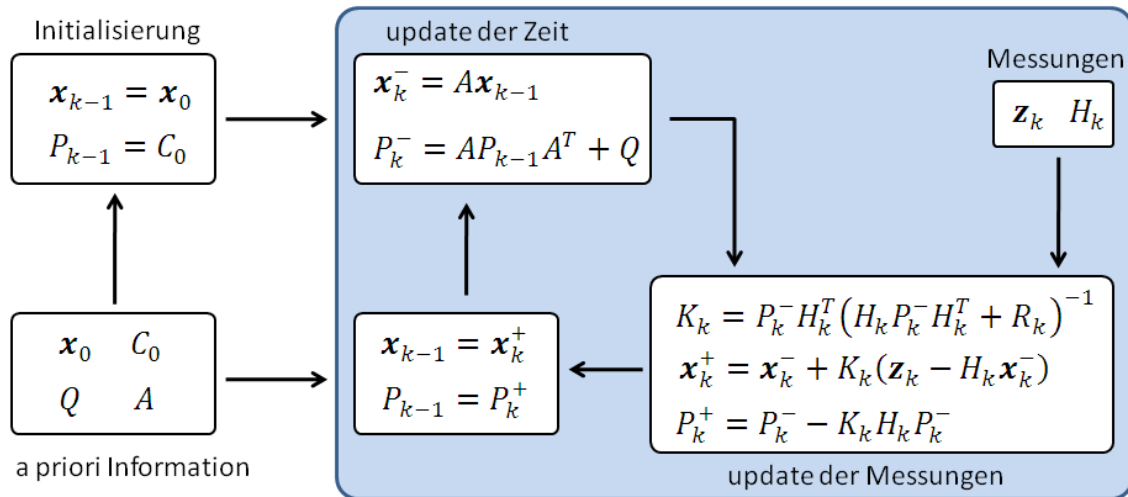


Abb. 4-12: Schematischer Aufbau des Kalman Filters

Das Kalman Filter verarbeitet Troposphären- und Uhrenparameter wie stochastische Parameter. Das *zenith wet delay* (ZWD) wird als *random walk* mit einer Varianz Rate (*variance rate*) von typischer Weise $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ modelliert. Das ZWD ist mit Gradienten in Nord- und Ost-richtung überlagert, welche auch als *random walk* modelliert werden. Die für die VLBI2010-Simulationen verwendete *variance rate* der Gradienten beträgt $0.5 \text{ ps}^2/\text{s}$ (Kapitel 5.3). Die VLBI-Stationsuhren werden über Rate, als deterministischen Parameter, und Offset, als stochastischen Parameter, in das Kalman Filter eingeführt. Der Offset wird dabei als *random walk* mit einer *variance rate* von $1 \text{ ps}^2/\text{s}$ modelliert. In OCCAM werden die angeführten *variance rates* für alle VLBI-Stationen verwendet.

4.3.3 Vergleich Gauß-Markov Modell und Kalman Filter

Der Einsatz des Gauß-Markov LSM-Algorithmus, wie er in OCCAM realisiert ist, kann ohne essentielle Änderungen der Programmarchitektur nicht für Auswertungen von Beobachtungsplänen mit einer Anzahl an Beobachtungen $> 10\,000$ durchgeführt werden. Daher wird in dieser Arbeit das Kalman Filter verwendet. Bevor das Kalman Filter für weitere Simulationen eingesetzt wird, wird ein Vergleich zwischen Gauß-Markov und Kalman Filter anhand von Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten durchgeführt.

Der Beobachtungsplan für den Vergleich basiert auf einem Netzwerk mit 16 VLBI-Stationen und 9 678 Beobachtungen in 24 Stunden. Im Mittel hat jede der 16 Stationen 11 Beobachtungen pro Stunde, der maximale Zeitabstand zwischen zwei Beobachtungen beträgt 7 min und 20 s.

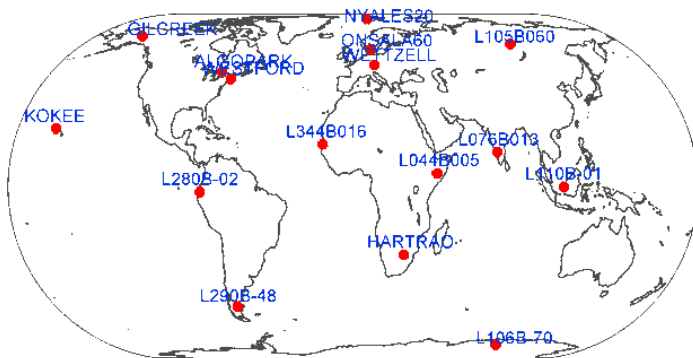


Abb. 4-13: Stationsnetzwerk für den Vergleich Gauß-Markov LSM und Kalman Filter.

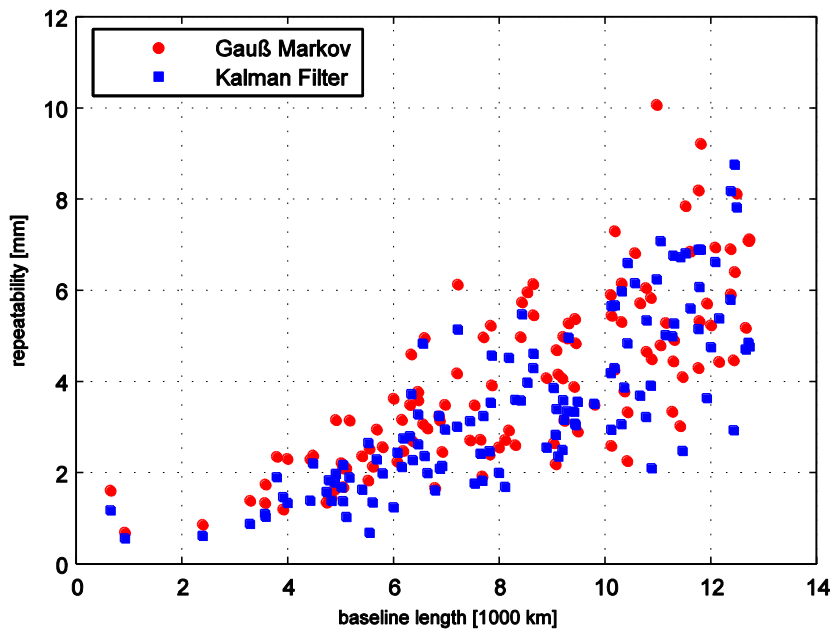


Abb. 4-14: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den Vergleich von Gauß-Markov LSM und Kalman Filter in OCCAM.

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit ist in Abb. 4-14 für die Auswertung mit dem Gauß-Markov Modell (rot) und das Kalman Filter (blau) dargestellt. Die Differenzen der beiden Lösungen sind in Abb. 4-15 abgebildet. Die Differenzen liegen im Bereich von ± 4 mm, dabei sind 67% positiv im Sinne Gauß-Markov minus Kalman Filter, wobei die maximale Verbesserung des Kalman Filters 40% beträgt. Dies ist dadurch zu erklären, dass beim Kalman Filter zu

jeder Epoche die Schätzung der Parameter der feuchten Laufzeitverzögerung und der VLBI-Stationsuhr durchgeführt wird, während beim Gauß-Markov Modell feuchte Laufzeitverzögerung und Uhr als kontinuierliche stückweise lineare Funktion mit einem festen Zeitintervall von z.B. 30 min geschätzt wird. Das ist ein essentieller Vorteil des Kalman Filters für weitere Simulationen mit dem Monte-Carlo-Simulator, da die Auflösung der feuchten Laufzeitverzögerung und der Uhrenschätzwerte nur von der Beobachtungsdichte des zu analysierenden Beobachtungsplans abhängt. Für das Gauß-Markov Modell muss das optimale Zeitintervall für jeden Beobachtungsplan bestimmt werden.

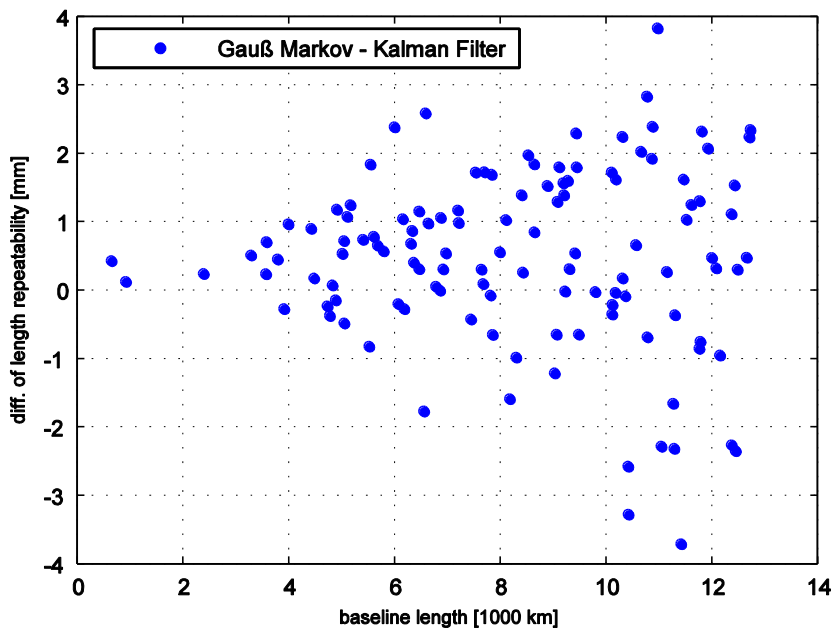


Abb. 4-15: Differenzen der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit der Auswertung der Testdaten mit 120 Basislinien, analysiert mit dem Gauß-Markov Modell und dem Kalman Filter.

Streng genommen müssen beide Verfahren die gleichen Resultate liefern, aber aufgrund der verschiedenen Arten zur Schätzung der Parameter entsteht der Unterschied der beiden Lösungen. Für die weiteren Simulationen wurde ausschließlich das Kalman Filter verwendet, da es gegenüber der Lösung mit dem Gauß-Markov Modell folgende Vorteile aufweist:

- Das Kalman Filter schätzt zu jeder Epoche die feuchten Laufzeitverzögerungen und die VLBI-Stationsuhren. Dadurch muss keine manuelle Anpassung, an die vom Beobachtungsplan vorgegebenen Beobachtungsintervalle, erfolgen.
- Das Kalman Filter benötigt eine viel geringere Rechenzeit als das Gauß-Markov Modell.
- Mit dem Kalman Filter kann OCCAM 6.2 SIM VLBI *sessions* mit > 10 000 Beobachtungen berechnen, ohne die gesamte Programmarchitektur zu ändern.

4.4 Ablauf einer Monte-Carlo-Simulation

In diesem Abschnitt wird der schematische Ablauf einer VLBI-Simulation, wie sie in den folgenden Kapiteln verwendet wurde, dargestellt. Für den Monte-Carlo-Simulator ist es nötig, vorab einen VLBI-Beobachtungsplan zu erstellen. Dieser Beobachtungsplan wird mit dem Programmpaket SKED (Vandenberg, 1999) bzw. in einer für die Simulation leicht veränderten Version von SKED (Kapitel 4.2) erstellt. Der Beobachtungsplan enthält Informationen über den Zeitpunkt der Beobachtung, die beobachtete Radioquelle und die Beobachtungsrichtung in Azimut und Elevation an der jeweiligen Beobachtungsstation. Eine Matlab-Routine verwendet diese Informationen aus dem Beobachtungsplan um mittels eines Turbulenzmodells (Kapitel 4.1.4) die *zenith wet delay* (ZWD) Werte an der jeweiligen Beobachtungsstation zu berechnen. Die dafür benötigten Eingangsparameter sind in Kapitel 4.1.4 erläutert.

Der Output ist eine ASCII-Datei, in der für jeden Beobachtungszeitpunkt eine Zeile reserviert ist. Der Beobachtungszeitpunkt ist im modifizierten Julianischen Datum (mjd) gegeben. Die ZWD-Werte sind Spaltenweise an den Beobachtungsstationen angegeben. Die Stationsreihenfolge in dieser Datei ist alphabetisch. Dadurch kann man sich einen *File-Header* zur Erklärung ersparen und kennt trotzdem die richtige Stationsreihenfolge. Findet eine Beobachtung an der Beobachtungsstation zu einem gewissen Zeitpunkt statt, wird in diese Zeile der berechnete ZWD-Wert geschrieben, beobachtet die Station zu diesem Zeitpunkt nicht, dann wird an diese Stelle eine Null geschrieben. Dieses Ausgabeformat ermöglicht es, auch in der weiteren Verarbeitung der Daten eine Kontrolle über die richtige Stationszuordnung zu haben. Eine eindeutige Zuweisung der ZWD-Werte ist zusammen mit dem Beobachtungsplan möglich, da die Zeilen der Beobachtungen bzw. der beobachteten Quelle, mit den Zeilen des Turbulenzfiles exakt übereinstimmen.

Der Simulator berechnet für einen Beobachtungsplan 25 Simulationsdurchläufe, welche in einem File gespeichert werden. Dieses ZWD File wird in den MCS eingelesen, wobei immer nur 1 Tag nach dem anderen (eine Realisierung von 25 nacheinander) eingelesen wird. Der MCS ist direkt in der Auswertesoftware OCCAM implementiert.

OCCAM benötigt zur Verarbeitung der VLBI-Daten das sogenannte NGS-File. Für die Simulation wird das Beobachtungsfile in eine *empty NGS Card*, also ein leeres NGS-File mit Hilfe eines Perl Skripts umgeschrieben. In diesem File stehen Nullen für alle Beobachtungen. OCCAM 6.2 SIM kann diese leeren Dateien einlesen und eine VLBI-Auswertung starten. Der MCS ist eine Subroutine in OCCAM 6.2 SIM. Der verkürzte Beobachtungsvektor wird aus den ZWD, den Uhren und den Werten des Messrauschens zusammengesetzt (Kapitel 4.1). Dabei werden die Uhrenwerte aus einem *random walk* plus einem *integrated random walk* simuliert. Dies geschieht mittels einer FORTRAN Subroutine, die direkt in OCCAM implementiert ist. In diesem Programm wird auch das weiße Rauschen für jede Beobachtung, 4 ps für die Simulationen des VLBI2010-Systems, generiert. Die *Allan Standard Deviation* (ASD) als Eingangsparameter der Uhren, sowie die gewünschte Standardabweichung des weißen Rauschens werden über ein externes File *noise* eingelesen und können so jederzeit geändert werden ohne die Subroutinen in OCCAM verändern zu müssen. Der MCS berechnet mit diesen Einstellungen den verkürzten Beobachtungsvektor $o - c$ (*observed - computed*) und ein weiteres Unterprogramm in OCCAM ermittelt die Unbekannten mittels des Gauß-Markov Modells oder eines Kalman Filters. Die Simulation und die Auswertung werden 25 mal wiederholt, wobei sich die Zufallszahlen für die Simulation ändern (Abb. 4-16).

Als Ausgabefiles erhält man 25 ASCII Dateien, welche in Matlab importiert werden, um in späterer Folge die Ausgabeparameter wie Basislinienlängen, EOPs, 3D RMS-Werte der Stationsposition, Uhren- und Troposphärenschätzwerte graphisch darzustellen.

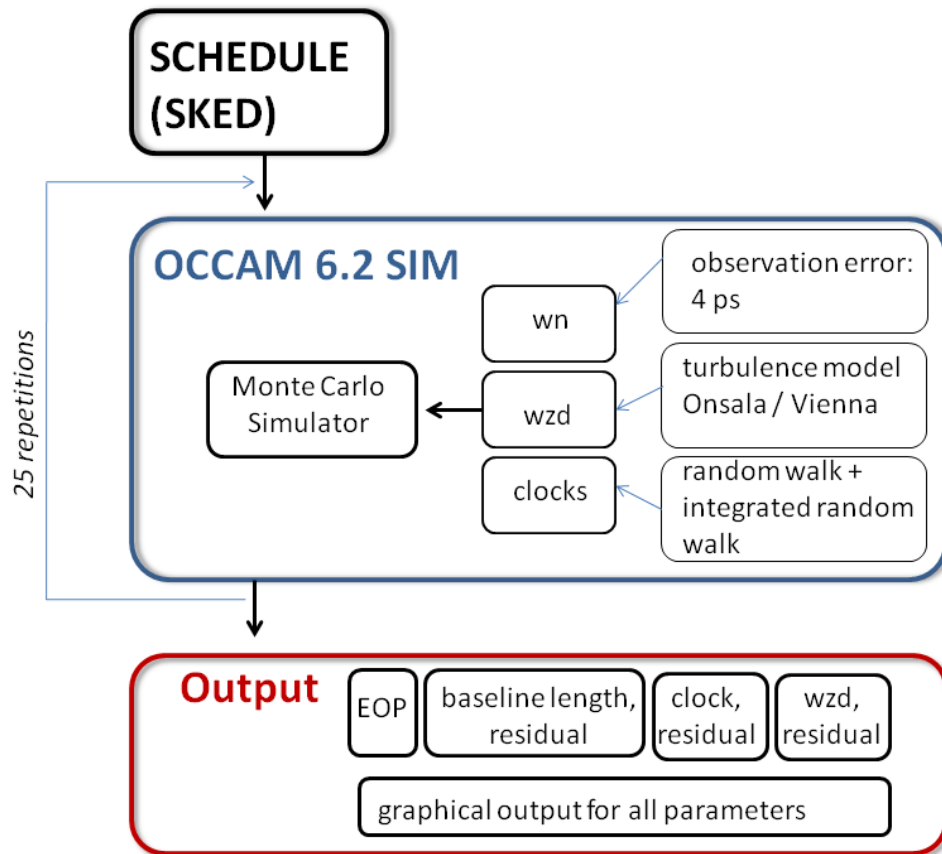


Abb. 4-16: Schematischer Ablauf einer VLBI2010 Simulation.

Grundlagen zur Berechnung der Parameter, die für den Vergleich der verschiedenen Analysen herangezogen werden:

Basislinienlängen-Wiederholbarkeit:

$$std = \sqrt{\frac{dBsl \cdot dBsl^T}{n - 1}}$$

(4.4-1)

RMS (root mean square):

$$rms = \sqrt{\frac{dx \cdot dx^T}{n}}$$

(4.4-2)

Fehler des RMS:

$$\sigma = \frac{rms}{\sqrt{2n}}$$

(4.4-3)

Transformationen von X,Y und Z im kartesischen Koordinatensystem zu den Vertikal, Nord und Ostkomponente:

Dafür benötigt man folgende Drehmatrizen, die Drehmatrix um die y-Achse:

$$R_y = \begin{pmatrix} \cos & 0 & -\sin \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin & 0 & \cos \end{pmatrix}, \quad (4.4-4)$$

die Drehmatrix um die z-Achse:

$$R_z = \begin{pmatrix} \cos & \sin & 0 \\ -\sin & \cos & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.4-5)$$

und eine Spiegelungsmatrix zur Spiegelung an der x-Achse:

$$S_x = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (4.4-6)$$

Für die Berechnung der Vertikal-, Nord- und Ostkomponente muss die geographische Breite und Länge der Station bekannt sein. Dann ergeben sich die Komponenten nach einer Spiegelung und 2 Rotationen um die y- und z-Achse zu:

$$\vec{\mu} = S_x \cdot R_y(90 - \varphi) \cdot R_z(\lambda) \cdot \vec{x}. \quad (4.4-7)$$

Das Referenzsystem aus den a priori Stationskoordinaten und das Referenzsystem, das aus den geschätzten VLBI-Stationskoordinaten besteht, kann mittels 7 Parameter Helmert-Transformation miteinander verknüpft werden. Der Maßstab m ist dabei für die VLBI2010-Untersuchungen von Bedeutung.

$$\vec{\mu} = d\vec{x} + (1 + m)R \cdot \vec{x}. \quad (4.4-8)$$

Aus der Annahme, dass beide Systeme gegeneinander nur um sehr kleine Winkel rotiert sind, folgt:

$$\begin{pmatrix} \hat{X}_i \\ \hat{Y}_i \\ \hat{Z}_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} + (1 + m) \cdot \begin{pmatrix} 1 & \gamma & -\beta \\ -\gamma & 1 & \alpha \\ \beta & -\alpha & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{pmatrix}. \quad (4.4-9)$$

5 Einflussgrößen des Monte-Carlo-Simulators

5.1 Einfluss der VLBI-Stationsuhren, des Beobachtungsfehlers und des simulierten ZWD

Für die ersten Abschätzungen des Einflusses der einzelnen Parameter wie z.B. der modellierten Uhr, des weißen Rauschens, des simulierten ZWD und des Beobachtungsplanes auf die VLBI-Auswertung, wird für die Modellierung der Atmosphäre das sehr einfache Modell des *random walk* Prozess verwendet (Kapitel 4.1.3). Die VLBI-Stationsuhren werden durch einen *random walk plus integrated random walk* Prozess dargestellt. Die Simulationen werden in einem Matlab Skript durchgeführt, und anschließend wird der verkürzte Beobachtungsvektor $o - c$ (4.1-1) in ein NGS-File geschrieben, welches direkt aus dem Beobachtungsplan erstellt wird. Die verschiedenen *Power Spectral Densities* (PSD) der Modellierung des ZWD, *Allan Standard Deviations* (ASD) der Uhrenmodellierung und verschiedene Werte für das weiße Rauschen sind in Tab. 5.1-1 angeführt.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden mit dem Softwarepaket OCCAM 6.2 SIM ausgewertet. Die Analyse wird mit einem Kalman Filter durchgeführt, der zu jedem Beobachtungszeitpunkt ZWD und Uhren als *random walk* Prozess schätzt. Als Vergleichsparameter der verschiedenen Simulationsszenarien wird die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*baseline length repeatability*) herangezogen. Der MCS erstellt 25 modellierte 24 h VLBI-Experimente um die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit realistisch berechnen zu können. Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit ist die Standardabweichung der 25 Realisierungen der Basislinienlänge. Im Folgenden wird die Modellierung der ZWD, der Uhren und auch der Beobachtungsplan selbst variiert.

Tab. 5.1-1: Verschiedene PSD für die Modellierung des ZWD, ASD für die Modellierung der VLBI-Stationsuhren und drei verschiedene Werte für das weiße Rauschen, die in den folgenden Untersuchungen verwendet werden.

| | | | |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|-------|
| ZWD: | 0.1 [ps^2/s] | 0.7 [ps^2/s] | |
| Uhren: | $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min (ASD) | $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (ASD) | |
| WN: | 4 ps | 8 ps | 16 ps |

Dabei repräsentiert eine PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ eine sehr trockene Atmosphäre, die sich nur sehr gering auf die VLBI-Parameter auswirkt. Eine PSD von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ steht für Stationen mit einem sehr hohen feuchten Anteil der Atmosphäre. Für die VLBI-Stationsuhren gilt eine ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min als eine Genauigkeit die mit dem derzeit verwendeten System erwartet werden kann. Eine ASD von $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min kann nur mit einem sehr hohen technischen Aufwand realisiert werden und gilt als extrem genaues Zeitnormal.

5.1.1 Einfluss des Beobachtungsplans auf die VLBI-Auswertung

Drei verschiedene Beobachtungspläne mit exakt dem gleichen Stationsnetzwerk (Abb. 5.1 1) werden für die Simulation erstellt. Das Netzwerk beinhaltet 16 Stationen, basierend auf der Stationsanordnung der CONT02-Kampagne (Thomas et al., 2003) und 8 weiteren fiktiven Stationen. Der Stationsname der fiktiven Stationen setzt sich aus deren Länge und Breite zusammen. Die Stationen wurden unter dem Aspekt der globalen Stationsverteilung dem CONT02-Netzwerk zugefügt, ohne dabei politische, infrastrukturelle oder geologische Aspekte zu berücksichtigen. Die Fahrgeschwindigkeit der Antennen beträgt für alle Antennen $18^\circ/\text{s}$ in Azimut und $4.5^\circ/\text{s}$ in Elevation, mit einer Beschleunigung von $3.6^\circ/\text{s}^2$ in Azimut und $0.9^\circ/\text{s}^2$ in Elevation. Die hier verwendeten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen sind sehr hoch, praktisch und wirtschaftlich sind solche Geschwindigkeiten nicht zu erreichen. Eine Möglichkeit um so extreme Drehgeschwindigkeiten realisieren zu können, ist der gleichzeitige Einsatz von 2 Radioteleskopen an einer Station. Während ein Teleskop auf die zu beobachtende Radioquelle gerichtet ist, kann das zweite Radioteleskop zu der Radioquelle geführt werden, die als nächstes beobachtet wird.

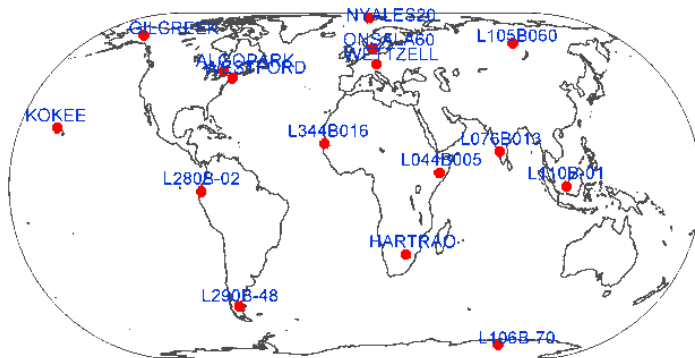


Abb. 5-1: Stationsnetzwerk basierend auf 8 Stationen der CONT02-Kampagne mit 8 weiteren fiktiven Stationen, deren Stationsname sich aus Länge und Breite der Station zusammensetzt. Bei der Stationsanordnung wurde versucht, eine möglichst globale Stationsverteilung zu erreichen, ohne die praktische und politische Realisierung zu berücksichtigen.

Die Beobachtungspläne sind mit verschiedenen Scan-Längen und verschiedenen Quellenkatalogen erzeugt, was zu einem Unterschied in der Anzahl der Beobachtungen und einer unterschiedlichen Beobachtungsdichte des 24 h VLBI-Experiments führt (Tab. 5.1 1). Der Beobachtungsplan sked1 hat eine maximale Scan-Länge von 60 s und verwendet den geodätischen Quellenkatalog mit rund 70 Radioquellen. Dieser Beobachtungsplan weist eine unterschiedliche Anzahl der Beobachtungen an den einzelnen VLBI-Stationen auf, weshalb er als inhomogen eingestuft werden kann. Große Unterschiede ergeben sich hauptsächlich für südliche Stationen (Abb. 5-2). Für sked2 wird eine Scan-Länge von 5 s eingeführt und ein Quellenkatalog mit 230 Radioquellen verwendet. Das Ergebnis ist ein nahezu homogener Beobachtungsplan, da der verwendete Quellenkatalog zusätzliche südliche Radioquellen beinhaltet. Sked3 optimiert den Beobachtungsplan auf geringe Wartezeiten und maximale Anzahl der Beobachtungen an den einzelnen VLBI-Stationen. Für nördliche Stationen kann mit diesem Algorithmus die Anzahl der Beobachtungen nahezu verdoppelt werden, für südliche bleibt die Anzahl der Beobachtungen aber annähernd gleich sked2.

Tab. 5.1-2: Parameter der drei verschiedenen Beobachtungspläne (sked1, sked2 und sked3). Ein Beobachtungsplan wird dann als homogen angesehen (siehe letzte Zeile in der Tabelle) wenn die Anzahl der Beobachtungen an allen 16 Stationen gleich ist.

| | sked1 | sked2 | sked3 |
|----------------|--------|---------|---------|
| Scan-Länge [s] | 5 - 60 | 5 | 5 |
| Scans/h/stat | 45 | 100 | 171 |
| Scans | 2 737 | 5 760 | 9 386 |
| Beobachtungen | 57 595 | 116 308 | 226 639 |
| homogen | nein | ja | nein |

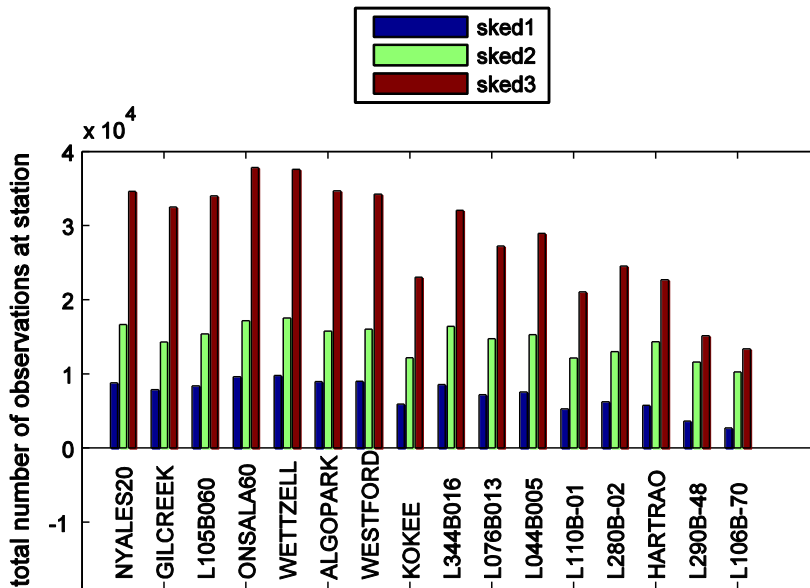


Abb. 5-2: Anzahl der Beobachtungen an den VLBI-Stationen für die Beobachtungspläne sked1, sked2 und sked3. Die Stationen sind ihrer geographischen Position nach von Nord nach Süd aufgetragen.

Allen drei unterschiedlichen Beobachtungsplänen liegen die identen Parameter für den MCS zu Grunde. Das ZWD wurde mit einer PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$, die VLBI-Stationen mit einer ASD von $2 \cdot 10^{-15} @ 15 \text{ min}$ und einem weißen Rauschen von 4 ps modelliert. Diese Werte repräsentieren die minimalen Variationen der stochastischen Prozesse und geben so die Möglichkeit, direkt den Einfluss der Beobachtungspläne auf die VLBI-Auswertung zu sehen. Betrachtet man Abb. 5-3, so kann man für den Beobachtungsplan sked1 (rote Kreise) eindeutig sehen, dass die Wiederholbarkeit schlechter ist als für sked2 (grüne Dreiecke). Weiters findet man eine Gruppierung von Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten die deutlich schlechter sind als alle anderen für sked1 berechneten. Diese Basislinien beinhalten alle die Station L106B-70, welche die südlichste Station in dem Stationsnetzwerk ist und in 24 Stunden nur 2 703 Beobachtungen durchführt. Im Vergleich dazu werden der Station WETTZELL im gleichen Beobachtungsplan 9 754 Beobachtungen zugeteilt (Abb. 5-2). Dieser Effekt kann durch den homogenen Beobachtungsplan sked2 eliminiert werden und man sieht eine deutliche Verbesserung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten. Für den Beobachtungsplan sked3 (blaue Quadrate), der gegenüber sked2 nahezu die doppelte Anzahl an Beobachtungen aufweist, kann im Vergleich zu sked2 nur eine geringe Genauigkeitssteigerung erreicht werden.

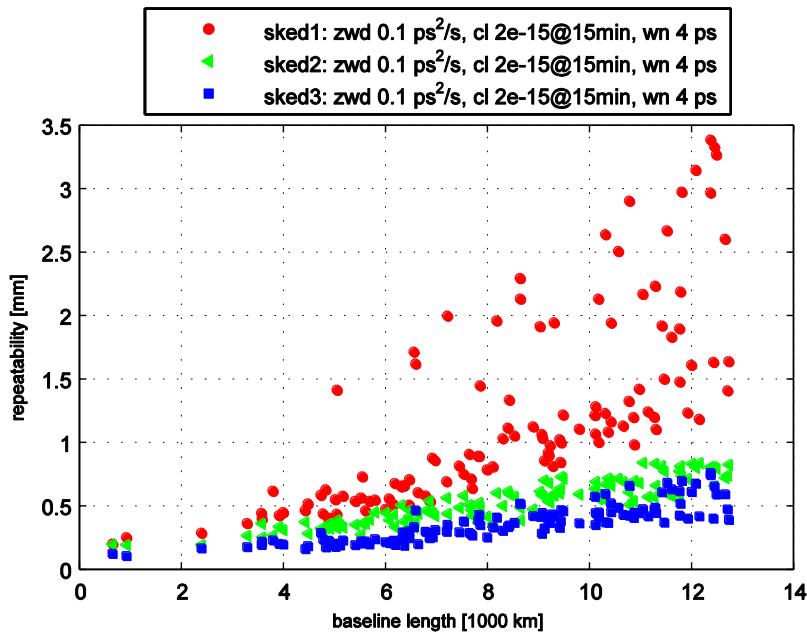


Abb. 5-3: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für drei verschiedene Beobachtungspläne, sked1 (57 595 Beobachtungen, rote Kreise), sked2 (116 308 Beobachtungen, grüne Dreiecke) und sked3 (226 639 Beobachtungen, blaue Quadrate). Die Basislinienlänge (*baseline length*) ist in 1 000 km angegeben.

5.1.2 Einfluss des weißen Rauschens

Für weitere Vergleiche wurde der Beobachtungsplan sked3 verwendet, um die Einflüsse des Beobachtungsplanes auf die VLBI-Auswertung zu minimieren und den Einfluss der untersuchten Parameter besser sehen zu können. Die stochastischen Parameter für ZWD, PSD 0.1 ps²/s, und VLBI-Stationsuhren, ASD 2·10⁻¹⁵@15 min, sind minimal gewählt (Tab. 5.1-1).

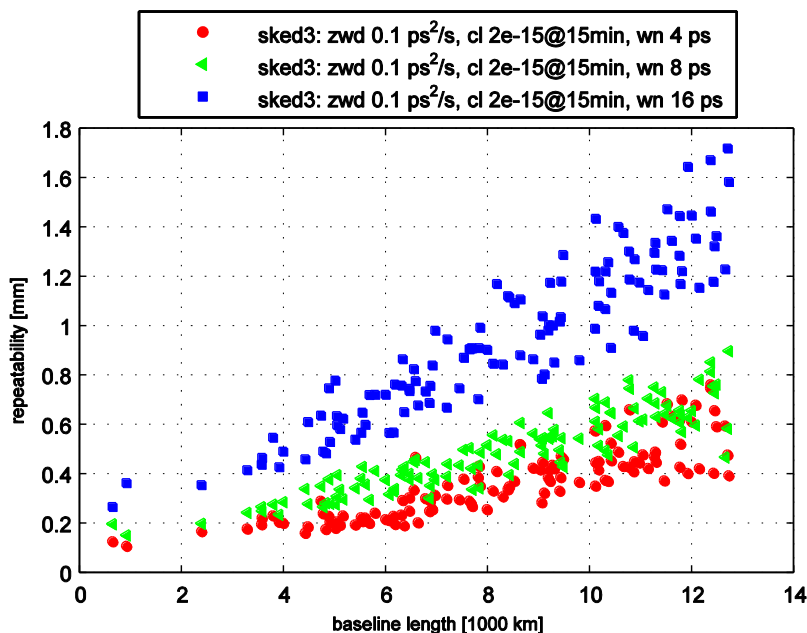


Abb. 5-4: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für verschiedene Größen von weißem Rauschen, 4, 8 und 16 ps. Die stochastischen Parameter für ZWD (0.1 ps²/s) und VLBI-Stationsuhren (2·10⁻¹⁵@15 min) sind minimal gewählt, um den Einfluss des weißen Rauschens besser zu sehen.

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (Abb. 5-4) lässt deutlich drei verschiedene Niveaus für das weiße Rauschen erkennen. Eine deutliche Verbesserung ist sowohl zwischen 16 ps und 8 ps als auch zwischen 8 ps und 4 ps zu erkennen.

Wählt man die PSD des ZWD aber als Maximum mit $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$, so dominiert der Einfluss der modellierten Atmosphäre die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit. Es sind keine Unterschiede zwischen einem weißen Rauschen von 4 und 8 ps zu erkennen. Die Analyse zeigt auch nur einen sehr geringen Unterschied zwischen 8 und 16 ps (Abb. 5-5).

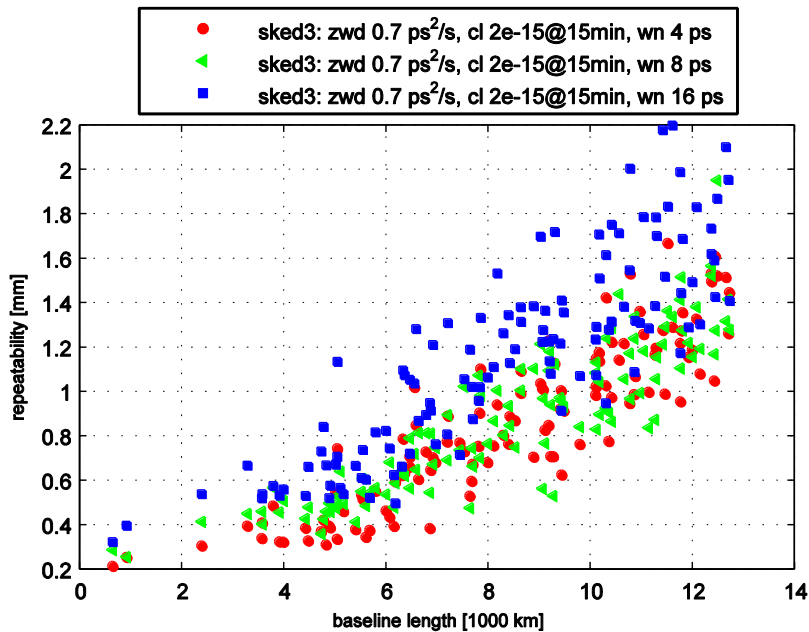


Abb. 5-5: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für verschiedene Größen von weißem Rauschen, 4, 8 und 16 ps. Die stochastischen Parameter für ZWD ($0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$) sind maximal gewählt, um den dominierenden Parameter zu bestimmen.

Wählt man nun die VLBI-Stationsuhr zu einem Maximum von $\text{ASD } 1 \cdot 10^{-14} @ 50 \text{ min}$ und berechnet neuerlich eine Monte-Carlo-Simulation mit drei verschiedenen Werten für das weiße Rauschen, kann man abermals untersuchen, ob sich die drei verschiedenen Werte für das weiße Rauschen auch in der Analyse in der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit auswirken. In Abb. 5-6 sind die berechneten Basislinienlängen und deren Wiederholbarkeiten gegeben. Der Einfluss des weißen Rauschens ist deutlich in den drei verschiedenen Genauigkeitsniveaus gegeben.

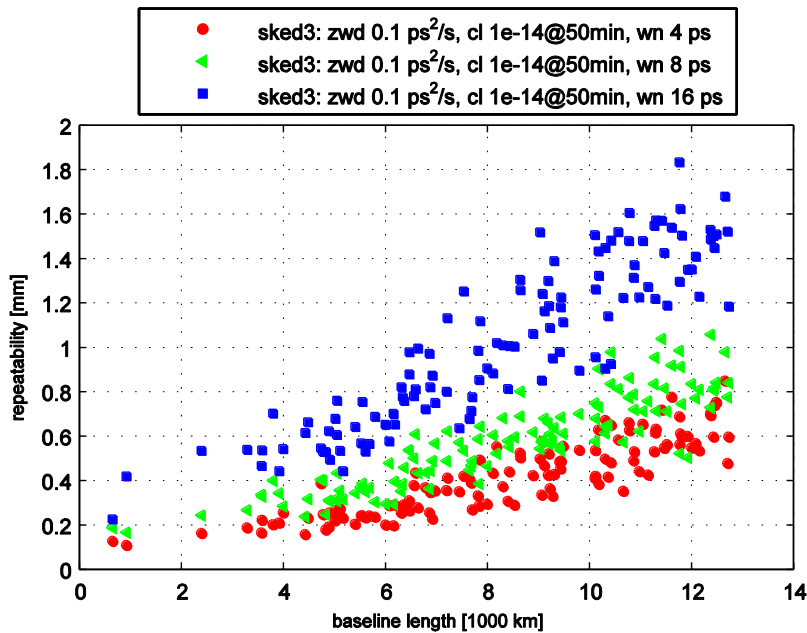


Abb. 5-6: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für verschiedene Größen von weißem Rauschen, 4, 8 und 16 ps. Die stochastischen Parameter für die VLBI-Stationsuhren ($1 \cdot 10^{-14}$ @50 min) sind maximal gewählt, um den dominierenden Parameter zu bestimmen.

5.1.3 Einfluss der VLBI-Stationsuhren

Wie in Kapitel 5.1.2 gezeigt, kann man einen Rückschluss über den Einfluss einer bestimmten Größe ziehen, indem man Minimal- und Maximalwerte in der Simulation verwendet. Um den Einfluss der VLBI-Stationsuhr zu zeigen, werden hier die zwei ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min als Maximalwert und $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min als Minimalwert (Tab. 5.1-1) angenommen. Eine ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min entspricht dabei einem zurzeit an den VLBI-Stationen eingesetzten Wasserstoff-Maser. Eine Steigerung um eine Potenz der Genauigkeit des Wasserstoff-Masers ist technisch eine absolute Herausforderung. Es ist zwar möglich, Wasserstoff-Maser mit einer ASD von $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min herzustellen, die Zeitübertragung auf das VLBI-System kann aber nicht mit dieser Genauigkeit realisiert werden.

Für die Analyse in OCCAM 6.2 SIM erzeugt der MCS für die zwei verschiedenen ASD der VLBI-Stationsuhr jeweils zwei Zeitreihen zu je 25 einzelnen 24-Stunden VLBI-Beobachtungen mit 4 ps und 16 ps weißem Rauschen.

Vergleicht man die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten (Abb. 5-7) der unterschiedlichen ASD, jeweils mit 4 ps und 16 ps weißem Rauschen, so kann man keinen signifikanten Unterschied für die verschiedenen Simulationen der VLBI-Stationsuhren erkennen. Die verschiedenen Niveaus des weißen Rauschens sind aber deutlich zu erkennen. Dies führt zu dem Schluss, dass die VLBI-Stationsuhren mit einer Genauigkeit von ASD $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min in der Simulation ausreichend genau sind und VLBI-Stationsuhren mit einer ASD $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min keine weitere Genauigkeitssteigerung mehr bringen.

Weitere Untersuchungen des Einflusses der VLBI-Stationsuhren sind in Kapitel 5.5 unter der Verwendung eines stationsabhängigen Turbulenzmodelles für die Simulation des ZWD zusammengefasst.

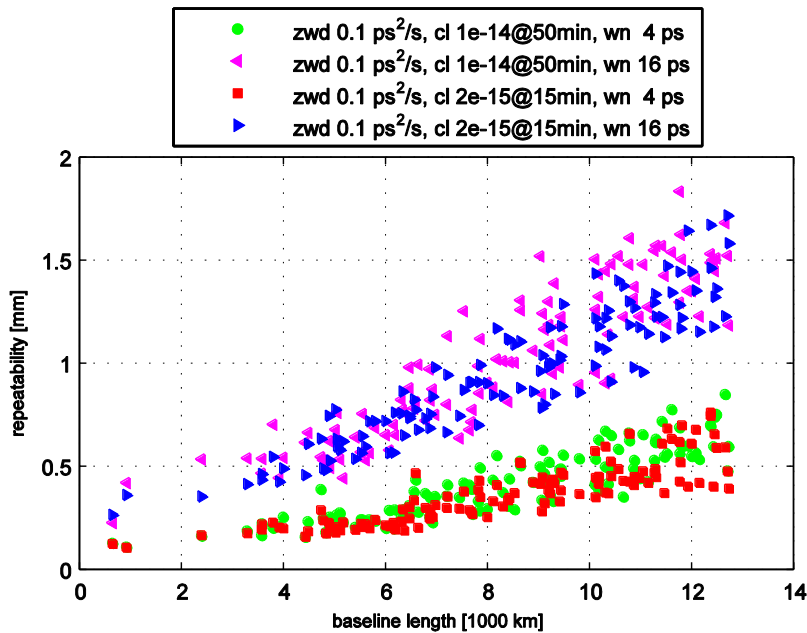


Abb. 5-7: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für zwei verschiedene Größen für das weiße Rauschen (4 und 16 ps) und zwei verschiedene ASD für die VLBI-Stationsuhren, $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min und $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min. Die Werte sind Extremwerte (Minima und Maxima), um den dominierenden Parameter bestimmen zu können.

5.1.4 Einfluss der Atmosphäre

Um den Einfluss der Atmosphäre bzw. des simulierten ZWD auf VLBI-Parameter wie Basislinienlängen abschätzen zu können, werden zwei Extremwerte, eine minimale und eine maximale PSD, für die Simulation des ZWD verwendet. Der MCS erzeugt jeweils zwei Zeitreihen mit einer PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ und $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ (Herring et al., 1990) zu je 25 einzelnen 24-Stunden VLBI-Beobachtungen mit 4 ps und 16 ps weißem Rauschen.

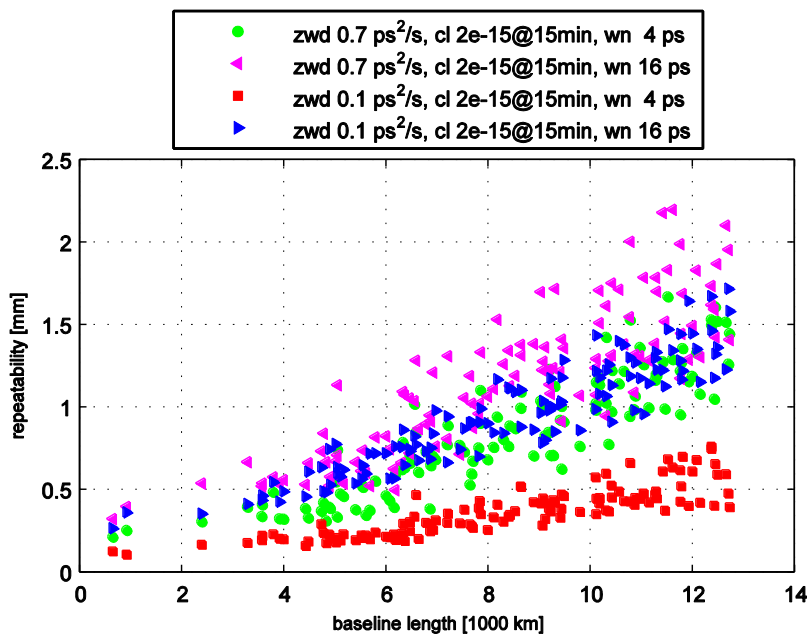


Abb. 5-8: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für zwei verschiedene Größen für das weiße Rauschen (4 und 16 ps) und zwei verschiedene PSD, $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ und $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$, für die Simulation des ZWD. Die Werte sind Extremwerte (Minima und Maxima), um den dominierenden Parameter bestimmen zu können.

Betrachtet man in Abb. 5-8 die MCS Realisierungen mit einer PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ und 4 ps weißem Rauschen (rote Quadrate), einem Minimum, und einer PSD von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ und 4 ps weißem Rauschen (grüne Kreise), so kann man eine deutliche Verbesserung bei der Verwendung der Minimalwerte für die Simulation des ZWD erkennen. Dieser Effekt wird bei einem weißen Rauschen von 16 ps sehr gedämpft. Hier ist keine deutliche Verbesserung zwischen einer PSD von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ (blaue Dreiecke) und einer PSD von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ (Magenta Dreiecke) erkennbar. In diesem Fall ist das weiße Rauschen zu groß, um eine Verbesserung der VLBI-Parameter nur über die Änderung der PSD des simulierten ZWD zu erreichen. Vergleicht man auch verschiedenes weißes Rauschen, 4 und 16 ps für eine Simulation mit $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ PSD für ZWD (grüne Kreise und Magenta Dreiecke), kann man die Verbesserung, die ein weißes Rauschen von 4 ps bringen sollte, nicht mehr so deutlich erkennen. Der Maximalwert für die Simulation von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ des ZWD dominiert die VLBI-Analyse, sodass ein geringeres weißes Rauschen keine deutliche Verbesserung des Ergebnisses bringt. Dies lässt die Schlussfolgerung zu, dass bei geringer Kenntnis bzw. schlechter Modellierung der Atmosphäre über der VLBI-Station ein verbessertes Beobachtungssystem nicht den gewünschten und deutlichen Erfolg in der Leistungssteigerung des gesamten VLBI-Systems bringt.

Um noch genauere Aussagen über die Entwicklung und Verbesserung des VLBI-Systems treffen zu können und um die in diesem Kapitel formulierten Aussagen untermauern zu können, wurde in der weiteren Arbeit mit Absprache des VLBI2010 Komitees die Modellierung des ZWD mit dem sehr einfachen Modell des *random walk* durch das realistischere Turbulenzmodell (Onsala und/oder Vienna Turbulenzmodell, Kapitel 4.1.4) ersetzt.

5.2 MCS mit Hilfe des Turbulenzmodells

Das Turbulenzmodell, das in Kapitel 4.1.4 beschrieben ist, wird für die VLBI-Stationen, die an der kontinuierlichen VLBI-Kampagne CONT05 teilgenommen haben (Abb. 5-9), verwendet, um ZWD-Werte zu erzeugen und eine Monte-Carlo-Simulation über die gesamte Beobachtungsdauer von 15 Tagen zu erstellen. Dies gibt die Möglichkeit Vergleich zwischen den beobachteten und den simulierten VLBI-Daten, bzw. deren Analyse mit dem Softwarepaket OCCAM, zu untersuchen.



Abb. 5-9: CONT05-Stationsnetzwerk mit 11 VLBI-Stationen.

Um das Turbulenzmodell berechnen zu können, benötigt man die *refractive index structure constant* (C_n), die Höhe der feuchten Atmosphäre (H) und die Windgeschwindigkeit (Wind) sowie die Windrichtung. Um möglichst realistische Werte für C_n und H zu bekommen, wurden hierfür Daten von Radiosonden, die in diesem Zeitraum direkt an oder auf gleicher geographischer Breite der VLBI-Stationen gestartet wurden, verwendet. Die Windgeschwindigkeit und Richtung wurde aus ECMWF-Wetterdaten für die jeweilige Station ermittelt und von Tobias Nilsson dem VLBI2010-Komitee zur Verfügung gestellt. Die Evaluierung der Parameter wurde für verschiedene Datensätze der C_n - und H -Werte durchgeführt. Für die ersten Arbeiten mit dem Turbulenzmodell stellte Tobias Nilsson die Zeitreihen der ZWD-Werte an den VLBI-Stationen zur Verfügung. Für weitere Versuche wurde das Vienna Turbulenzmodell verwendet, das wesentlich kürzere Rechenzeiten als das Onsala Turbulenzmodell (Kapitel 4.1.4) benötigt. Für den ersten Satz von C_n - und H -Werten („old C_n and H “) können auch die unterschiedlichen Modelle zur Berechnung des ZWD verglichen werden (Tab. 5.2-1). Im März 2008 präsentierte Tobias Nilsson im Rahmen seines Vortrages bei dem IVS-General-Meeting in St. Petersburg einen neuen Parametersatz für C_n und H („new“, Tab. 5.2-1), die sich von den bisher verwendeten Werten deutlich unterscheiden. Für diesen Parametersatz stehen nur ZWD-Zeitserien zur Verfügung die mit dem Vienna Turbulenzmodell ermittelt wurden. Daten mit dem Onsala Turbulenzmodell stehen dem VLBI2010-Komitee nicht zur Verfügung.

Tab. 5.2-1: Übersicht über die verwendeten Cn- und H-Werte, sowie der Windgeschwindigkeit in Nord und Ost Richtung

| Station | Cn old | H Onsala | H Vienna | Cn new | H new | Wind Nord | Wind Ost |
|-----------|-----------|-------------|-------------|-----------|----------|--------------|-------------|
| Algotpark | 1.04 | 2000 | 2000 | 2.0573 | 2573.8 | -2.32 | 9.91 |
| Gilcreek | 0.55 | 2079 | 1963 | 0.8323 | 3841.4 | -2.72 | -12.24 |
| HartRAO | 2.03 | 2450 | 1851 | 1.8897 | 3053.7 | 7.6 | -5.56 |
| Kokee | 2.30 | 1477 | 1779 | 4.0287 | 2104.7 | 7.95 | 8.71 |
| NyAlesund | 0.35 | 2173 | 1845 | 0.0596 | 4363.8 | 3.02 | 1.97 |
| Onsala | 0.72 | 2100 | 2100 | 1.5438 | 2929.5 | 2.57 | 12.49 |
| Svetloe | 0.64 | 2000 | 1705 | 1.384 | 2631.5 | 11.12 | -1.3 |
| TigoConc | 1.41 | 1869 | 2176 | 0.9198 | 3540.9 | 8.93 | -2.94 |
| Tsukuba | 1.45 | 1767 | 1912 | 3.7136 | 2054.9 | 10.6 | -0.3 |
| Westford | 1.17 | 2887 | 2269 | 3.4378 | 2288.8 | 6.01 | -10.45 |
| Wettzell | 0.94 | 2040 | 1856 | 4.4662 | 2238.9 | 7.25 | -7.47 |

Die geographische Breite und Länge der Radiosondendaten, von denen die neuen Cn- und H-Werte abgeleitet wurden, sind gemeinsam mit Breite und Länge der VLBI-Stationen in Tab. 5.2-2 angeführt.

Tab. 5.2-2: Breite und Länge der VLBI-Stationen und der Radiosondenstarts.

| VLBI-Station | | lat | lon | RS Station | lat | lon | Cn | H |
|--------------|----|--------|---------|------------------------|------|--------|--------|--------|
| Algotpark | AP | 45.96 | -78.07 | Buffalo | 42.9 | -78.7 | 2.0573 | 2573.8 |
| Gilcreek | GC | 64.98 | -147.50 | Fairbanks | 64.8 | -147.9 | 0.8323 | 3841.4 |
| HartRAO | HH | -25.89 | 27.69 | Miami (März 2005) | 25.8 | -80.4 | 1.8897 | 3053.7 |
| Kokee | KK | 22.13 | -159.67 | Lihue | 22.0 | -159.4 | 4.0287 | 2104.7 |
| NyAlesund | NY | 78.93 | 11.87 | Point Barrow | 71.3 | -156.8 | 0.0596 | 4363.8 |
| Onsala | ON | 57.39 | 11.93 | Lerwick | 60.1 | -1.2 | 1.5438 | 2929.5 |
| Svetloe | SV | 60.53 | 28.78 | Anchorage | 61.2 | -150.0 | 1.384 | 2631.5 |
| TigoConc | TC | -36.84 | -73.02 | Greensboro (März 2005) | 36.1 | -79.9 | 0.9198 | 3540.9 |
| Tsukuba | TS | 36.11 | 140.09 | Nashville | 36.2 | -86.6 | 3.7136 | 2054.9 |
| Westford | WF | 42.62 | -71.49 | Chatham | 41.7 | -70.0 | 3.4378 | 2288.8 |
| Wettzell | WZ | 49.14 | 12.88 | Herstmonceux | 50.9 | 0.3 | 4.4662 | 2238.9 |

Um eine Monte-Carlo-Simulation durchführen zu können wird der IVS-Beobachtungsplan für den ersten Tag der CONT05-Kampagne c0501.skd, der über den FTP Server <ftp://cddis.gsfc.nasa.gov/pub/vlbi/ivsdata/aux/2005/> einzusehen ist, für die verschiedenen Turbulenzmodelle verwendet. Der theoretische Beobachtungsplan muss mit dem wirklich aufgezeichneten VLBI-Daten genauestens übereinstimmen, was aber tatsächlich nicht zutrifft. Da manche Beobachtungen aus technischen Gründen nicht durchgeführt werden können oder eine Radioquelle länger als theoretisch vorgesehen beobachten werden muss, ist der theoretische Beobachtungsplan mit dem tatsächlichen Beobachtungen genauestens abzugleichen. Dies wird insbesondere in dem MCS sehr wichtig, da für das weiße Rauschen die tatsächlichen Varianzen des Beobachtungsrauschen der beobachteten VLBI-Daten in die Simulation eingebracht werden. Der MCS erzeugt somit den verkürzten Beobachtungsvektor aus dem mit dem Turbulenzmodell erzeugten ZWD, der mit einer ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min modellierten VLBI-Stationsuhr und einem weißen Rauschen, das die Varianz des tatsächlichen Beobachtungsfehlers aus der Korrelation aufweist.

Die VLBI-Analyse der simulierten Zeitreihen wird mit OCCAM 6.2 SIM durchgeführt. Das ZWD wird mit Hilfe der alten Cn- und H-Werte „old“ einmal mit dem Onsala Turbulenzmodell und einmal mit dem Vienna Turbulenzmodell berechnet, und mit den von Tobias Nilsson präsentierten neuen Parametern, Cn und H, mit dem Vienna Turbulenzmodell berechnet.

Vergleicht man die verschiedenen Turbulenzmodelle (Abb. 5-10), Onsala (Magenta Quadrate) und Vienna (rote Dreiecke) mit den Daten aus den tatsächlichen VLBI-Beobachtungen (blaue Kreise), so sieht man, dass die Simulationen mit den echten Daten bis zu einer Basislinienlänge von 6 000 km sehr gut übereinstimmen. Für Basislinien länger als 6 000 km kann keine gute Übereinstimmung gefunden werden. Betrachtet man die beiden Modelle Onsala und Vienna, so stellt man fest, dass das Onsala Modell eine im Mittel bessere Basislinienlängen-Wiederholbarkeit liefert und das Vienna Modell eine im Mittel schlechtere, als die Analyse mit echten Daten. Der größte Unterschied der beiden Modelle liegt darin, dass für das Onsala Modell die Windgeschwindigkeit alle sechs Stunden von ECMWF-Wetterdaten bezieht (Kapitel 4.1.4), während für das Vienna Modell über den gesamten zu simulierenden Zeitraum eine konstante Windgeschwindigkeit für die Simulation des ZWD verwendet wird. Das Turbulenzmodell mit den neuen Cn-Werten (grüne Dreiecke) hingegen zeigt auch bei kurzen Basislinienlängen keine gute Übereinstimmung mit den realen CONT05-Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten. Die mittlere Differenz zeigt eine deutlich schlechtere Basislinienlängen-Wiederholbarkeit als die tatsächlichen CONT05-Daten (Tab. 5.2-3).

Tab. 5.2-3: Mittlere Differenz der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit zwischen der tatsächlich beobachteten CONT05-Kampagne und den simulierten VLBI-Beobachtungen.

| Turbulenzmodell | Mittlere Differenz [mm] |
|-------------------|-------------------------|
| Onsala: old Cn, H | 1.2 |
| Vienna: old Cn, H | -0.6 |
| Vienna: new Cn, H | -5.1 |

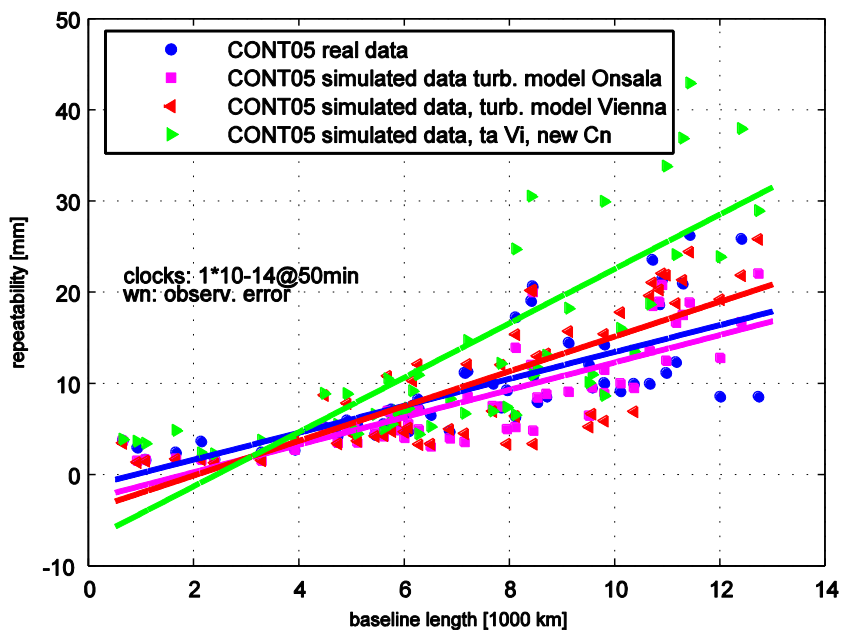


Abb. 5-10: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für die CONT05-Kampagne für die Analyse tatsächlich beobachteter Daten (blaue Kreise) und simulierter Daten. Das ZWD der simulierten Daten wurden mit dem Onsala Turbulenzmodell (magenta Rechtecke), dem Vienna Turbulenzmodell (rote Dreiecke) und dem Vienna Turbulenzmodell mit neuen Cn-Werten (grüne Dreiecke) durchgeführt.

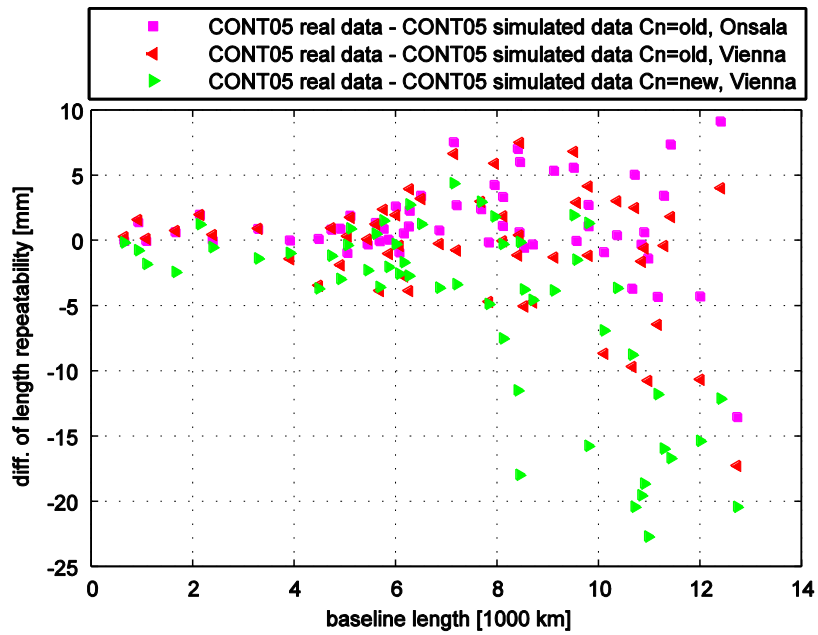


Abb. 5-11: Differenzen der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten zwischen beobachteten und simulierten Daten der CONT05-Kampagne.

Aufgrund der hier erzielten Resultate, wird im Folgenden entweder das Turbulenzmodell Onsala oder aufgrund der sehr geringen Rechenzeit das Turbulenzmodell Vienna mit den „old“ Cn- und H-Werten (Tab. 5.2-1) verwendet.

5.3 Einfluss des Kalman Filters

Für die weiteren Untersuchungen und Überlegungen des V2C ist es sehr wichtig, den Einfluss der Analysesoftware so gering wie möglich zu halten. Aufgrund der extrem dichten Messdaten und der sehr hohen zeitlichen Auflösung ist es nötig, die Analysesoftware auf diese Begebenheiten zu testen und abzustimmen. Die Analyse der simulierten Daten wird mit dem Softwarepaket OCCAM 6.2 SIM und dem implementierten Kalman Filter durchgeführt (Kapitel 4.3.2). Im Folgenden werden verschiedene *variance rates* für die Schätzung des ZWD und zur Schätzung der Gradienten getestet (Tab. 5.3-1). Wird eine Lösung mit Gradienten bestimmt, so setzt sich das *total wet delay (twd)* aus der feuchten Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung und den Gradienten in Nord- und Ostrichtung, wie in Gleichung (5.3-1) beschrieben ist, zusammen. Die Gradienten beschreiben dabei die azimutale Asymmetrie des feuchten Anteils der Atmosphäre.

$$twd = zwd \cdot mfw + mfw \cdot \cot(e) \cdot (G_N \cdot \cos(\alpha) + G_E \cdot \sin(\alpha)) \quad (5.3-1)$$

Für die Untersuchung verschiedener *variance rates* für ZWD und Gradienten wird der mit SKED erzeugte Beobachtungsplan stat16-12-3p5D0ln verwendet. Die VLBI-Kampagne beinhaltet das VLBI2010-Testnetzwerk mit 16 Stationen. Die dabei verwendete Antennendrehgeschwindigkeit beträgt 12 °/s in Azimut und 3.5 °/s in Elevation für alle 16 Antennen. Der Quellenkatalog beinhaltet 230 Radioquellen der Klasse 1-4. (Petrov, 2007). Die Hauptmerkmale des Beobachtungsplanes wie z.B. Anzahl der Beobachtungen, Scans/Stunde sind in Tab. 5.3-2 zusammengefasst.

Tab. 5.3-1: Lösung 1 bis 5 mit verschiedenen *variance rates* für ZWD und Gradienten.

| | <i>variance rates</i> für ZWD [ps ² /s] | <i>variance rates</i> für Gradienten [ps ² /s] |
|----------|--|---|
| Lösung 1 | 0.1 | no |
| Lösung 2 | 0.1 | 0.015 |
| Lösung 3 | 0.1 | 0.5 |
| Lösung 4 | 0.7 | 0.015 |
| Lösung 5 | 0.7 | 0.5 |
| Lösung 6 | 0.9 | 0.5 |

Tab. 5.3-2: Hauptkriterien des Beobachtungsplanes (stat16_12-3p5D0ln).

| | NY | WZ | HA | BN | BA | TS | HO | KK |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Beobachtungszeit [%] | 24 | 22 | 16 | 20 | 23 | 22 | 14 | 21 |
| Bewegungszeit [%] | 15 | 17 | 15 | 15 | 15 | 17 | 14 | 16 |
| Wartezeit [%] | 60 | 60 | 68 | 64 | 62 | 60 | 71 | 62 |
| #Scans | 3 729 | 3 533 | 2 645 | 3 177 | 3 576 | 3 500 | 2 348 | 3 351 |
| Scans/Stunde | 155 | 147 | 110 | 132 | 149 | 146 | 98 | 140 |

| | TA | GC | TC | WS | FT | KW | MS | KE | Mittel |
|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Beobachtungszeit [%] | 17 | 23 | 15 | 22 | 19 | 20 | 22 | 14 | 20 |
| Bewegungszeit [%] | 14 | 15 | 14 | 16 | 16 | 16 | 15 | 13 | 16 |
| Wartezeit [%] | 68 | 61 | 70 | 61 | 64 | 63 | 62 | 72 | 65 |
| #Scans | 2 766 | 3 639 | 2 474 | 3 549 | 2 962 | 3 143 | 3 430 | 2 308 | 3 133 |
| Scans/Stunde | 115 | 152 | 103 | 148 | 123 | 131 | 143 | 96 | 131 |

Für den MCS wurde das Onsala Turbulenzmodell verwendet, die VLBI-Stationsuhren wurden mit einer ASD von $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min simuliert und ein weißes Rauschen von 4 ps wurde zu jeder Basislinienbeobachtung addiert.

Bei der Betrachtung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten wird deutlich, dass eine Wahl betragsmäßig kleiner *variance rates* von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ für das ZWD und kleiner *variance rates* von $0.015 \text{ ps}^2/\text{s}$ für Gradienten (Lösung 2) zu einer deutlichen Steigerung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten gegenüber der Standardlösung ohne der Schätzung von Gradienten, Lösung 1, führt (Abb. 5-12). Erhöht man den Betrag der *variance rates* für ZWD auf $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ und gleichzeitig der Gradienten auf $0.5 \text{ ps}^2/\text{s}$ (Lösung 5), so kann man noch eine weitere Steigerung der Genauigkeit erkennen. Die Genauigkeit in der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit ist auf die verbesserte Schätzung des *total wet delay* zurückzuführen. In Abb. 5-12 sind nur die Lösungen 1, 2 und 5 angeführt, um die klare Verbesserung deutlich zu zeigen.

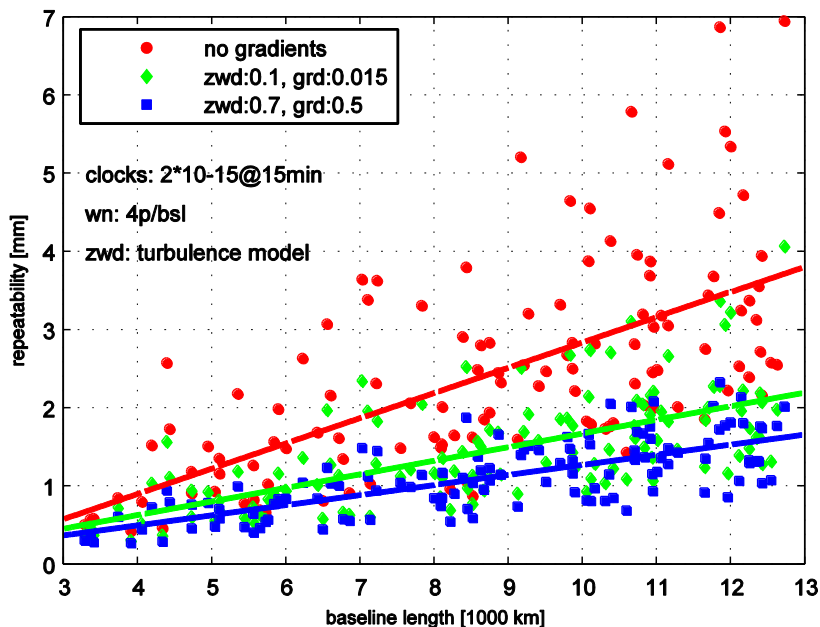


Abb. 5-12: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für die Lösung 1 ohne Gradienten, die Lösung 2 mit *variance rates* von $0.1 \text{ ps}^2/\text{s}$ für ZWD und $0.015 \text{ ps}^2/\text{s}$ für Gradienten und der Lösung 5 mit *variance rates* von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ für ZWD und $0.5 \text{ ps}^2/\text{s}$ für Gradienten.

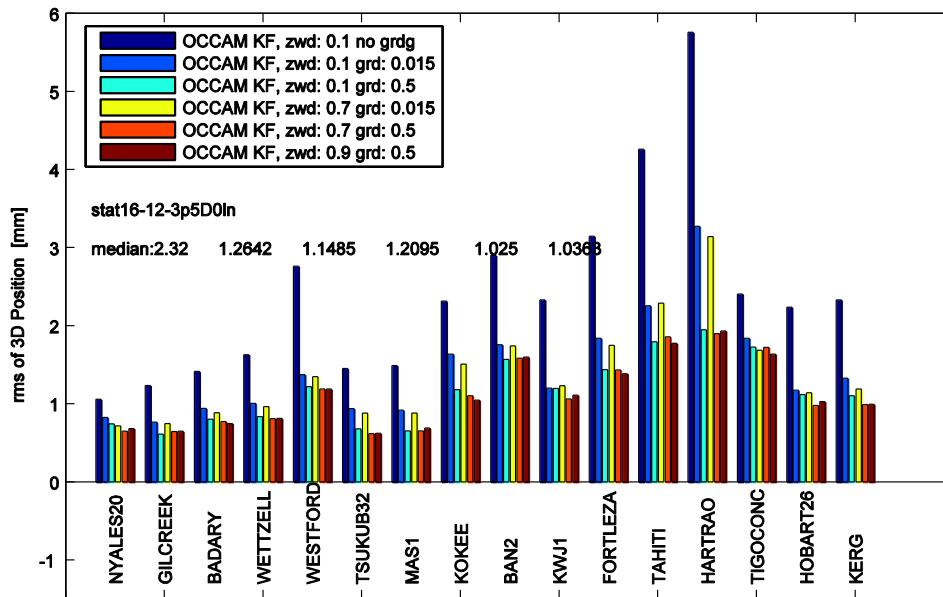


Abb. 5-13: RMS der 3D-Positionsbestimmung der VLBI-Stationen für die Lösungen 1-6.

Die zusätzliche Schätzung der Gradienten in Nord- und Ostrichtung bringt eine deutliche Genauigkeitssteigerung für die Bestimmung des *total wet delay* und folglich auch für die Parameter der VLBI-Analyse. Deshalb ist in Abb. 5-13 als vergleichende Größe die 3D-Stationenposition dargestellt. Dies bringt den Vorteil mit sich, direkt ablesen zu können, welche Stationen einen sehr hohen Anteil an der Verbesserung des Gesamtergebnisses beitragen bzw. an welcher Station die Schätzung des *total wet delay* durch unterschiedliche *variance rates* für ZWD und Gradienten wesentlich verbessert wird. Die Medianwerte des RMS der 3D-Stationenposition sind in Tab. 5.3-3 angeführt.

Tab. 5.3-3: Medianwerte des RMS der 3D-Stationenposition für die Lösungen 1 – 6.

| | <i>variance rates</i> für ZWD [ps ² /s] | <i>variance rates</i> für Gradienten [ps ² /s] | Median RMS d. 3D- Stationenposition [mm] |
|----------|--|---|---|
| Lösung 1 | 0.1 | no | 2.3 |
| Lösung 2 | 0.1 | 0.015 | 1.3 |
| Lösung 3 | 0.1 | 0.5 | 1.1 |
| Lösung 4 | 0.7 | 0.015 | 1.2 |
| Lösung 5 | 0.7 | 0.5 | 1.0 |
| Lösung 6 | 0.9 | 0.5 | 1.0 |

Wie aus Abb. 5-13 ersichtlich, tritt die größte Verbesserung an der Station HartRAO (Südafrika) auf. Diese Station hat in der Simulation eine sehr turbulente Atmosphäre, was sich in dem hohen Wert für Cn ($Cn = 2.03 \cdot 10^{-7} \text{m}^{-1/3}$) widerspiegelt. In Abb. 5-14 ist die Verbesserung der Schätzung des ZWD ersichtlich. Hier sind die simulierten ZWD als Eingangswerte in die Simulation (schwarze Kreuze) dargestellt und die aus der Simulation ermittelten ZWD mit Schätzung der Gradienten (blau) und ohne Gradientenschätzung (rot) darübergeplottet. Im Bereich des starken Anstieges der ZWD-Werte zwischen Stunde 15 und Stunde 20 kann man deutlich den Vorteil einer Gradientenlösung erkennen. Die Lösung mit einer *variance rate* von 0.5 ps²/s für Gradienten schätzt die simulierten ZWD-Werte auch bei einer sehr schnell-

len Änderung der Atmosphäre, wo hingegen die Lösung ohne Gradienten die simulierten ZWD-Werte nicht genau darstellen kann.

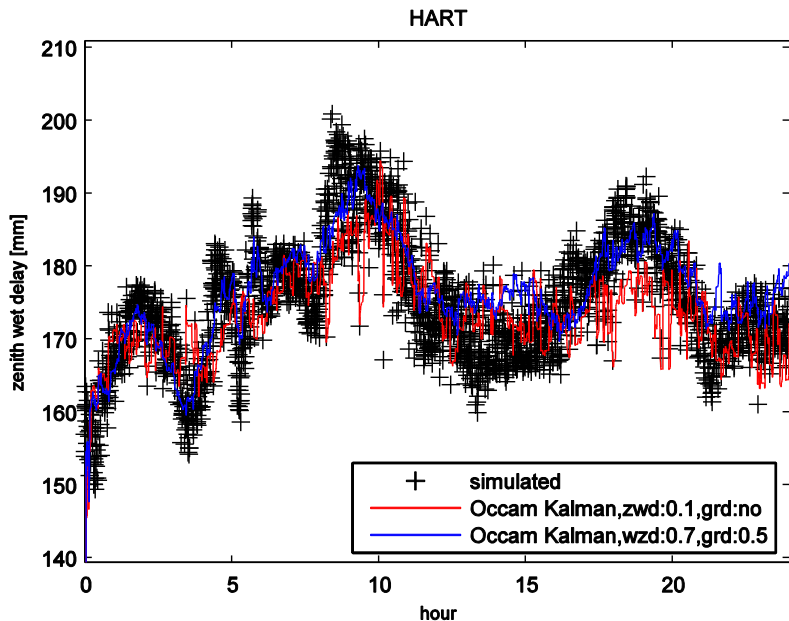


Abb. 5-14: Simuliertes ZWD und berechnetes ZWD, mit OCCAM KF ohne Gradienten (rot) und mit Gradienten (blau).

Sehr deutlich wird der Unterschied der beiden Lösungen wenn man sich nur die Differenzen zu den simulierten ZWD-Werten ansieht (Abb. 5-15). Auch hier ist deutlich ein sehr rauschendes Verhalten für die Lösung ohne Gradienten zu sehen. Das berechnete RMS für die Lösung 1 und die Lösung 5 sind 7.6 mm bzw. 6.4 mm.

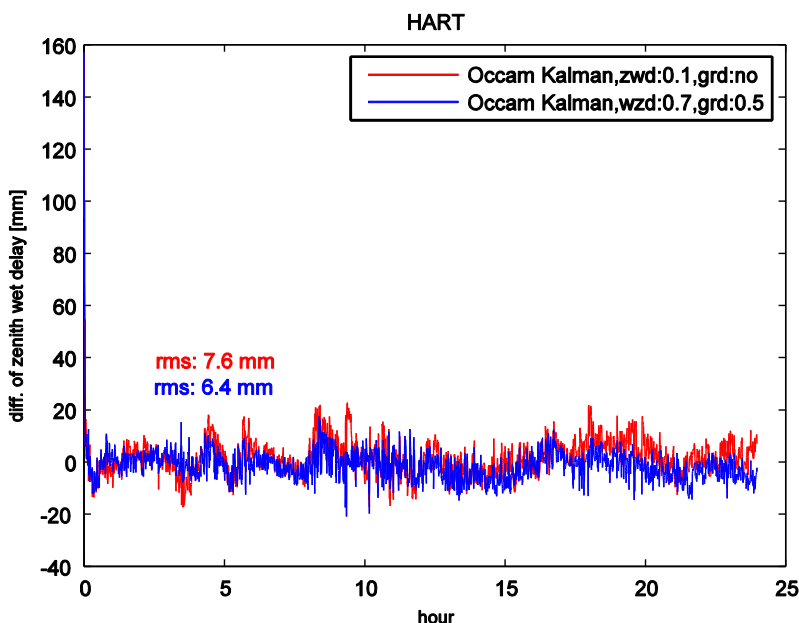


Abb. 5-15: Differenz zwischen simuliertem ZWD und berechnetem ZWD. In rot die Differenz der Lösung ohne Gradienten und in blau die Differenz der Lösung mit Gradienten.

Aufgrund der sehr hohen Beobachtungsdichte der simulierten Beobachtungspläne bietet die Verwendung von Gradienten eine Genauigkeitssteigerung der Bestimmung des ZWD und der analysierten Parameter wie der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit und der 3D-Stations-

position. Für die folgenden Untersuchungen wurde der Ansatz der Lösung 5 verwendet, dh. *variance rates* für ZWD = $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ und *variance rates* für Gradienten = $0.5 \text{ ps}^2/\text{s}$. Da die Beobachtungsdichte aller simulierten Beobachtungspläne sehr hoch ist, kann davon ausgegangen werden, dass dieser Ansatz der *variance rates* für ZWD und für Gradienten gut geeignet ist. Es darf aber nicht vergessen werden, dass streng genommen für jeden Beobachtungsplan ein neuer Ansatz als die „Beste Wahl“ der *variance rates* ermittelt werden kann. Im Folgenden wird darauf bewusst verzichtet, um den Einfluss der Analysesoftware so gering wie möglich zu halten.

5.4 Einfluss der Parameter Cn, H und Windgeschwindigkeit auf die VLBI-Analyse

Das Turbulenzmodell von Tobias Nilsson (Nilsson et al., 2007), das unter Kapitel 4.1.4 beschrieben ist, kann aus praktischen Gründen (extrem lange Rechenzeit) nicht effektiv für die Untersuchungen des V2C eingesetzt werden. Deshalb wurde das vereinfachte Turbulenzmodell Vienna (Kapitel 4.1.4), für die Simulationen des V2C verwendet. Der Unterschied dieses Modells zu dem Turbulenzmodell nach Nilsson liegt darin, dass die Varianz-Kovarianz Matrix nur einmal für 25 Wiederholungen aufgestellt wird, danach ändern sich nur noch die Zufallszahlen für jede Wiederholung des MCS und für jede Station. Die Parameter, die den meisten Anteil an der Simulation haben, sind:

- *refractive index structure constant* Cn,
- Höhe der feuchten Troposphäre und
- Windgeschwindigkeit sowie Windrichtung.

In diesem Kapitel wird der Einfluss der drei Hauptkriterien für das Turbulenzmodell auf die VLBI-Analyse, im Hinblick auf Basislinienlängen-Wiederholbarkeit und 3D-Stationspositionsgenauigkeit, untersucht.

Zu diesem Zweck muss die Stationsabhängigkeit in dem Turbulenzmodell eliminiert werden, d.h. ein Parameter für Cn, H oder Windgeschwindigkeit gilt für alle Stationen des Netzwerkes. In der folgenden Untersuchung wurde immer nur ein Parameter variiert, die übrigen Parameter hatten folgende Standardgrößen:

- Cn: $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$,
- H: 2 000 m,
- Windgeschwindigkeit: 10 m/s in Richtung Osten.

Als Netzwerk wurde das VLBI2010-Testnetzwerk mit 16 Stationen verwendet. Der Beobachtungsplan wurde mit der *uniform sky* Strategie (Kapitel 4.2.2) und einem Beobachtungsintervall von 60 Sekunden für alle Untersuchungen gewählt (Tab. 5.4-1). Die Parameter für den MCS, sowie die Parameter des Kalman Filters der verwendeten Analysesoftware OCCAM 6.2 SIM, sind in Tab. 5.4-2 zusammengefasst.

Tab. 5.4-1: Charakteristik des Beobachtungsplanes.

| Stationen | Beobachtungsintervall [s] | <i>uniform sky</i> [min] | Antennendrehgeschwindigkeit | | Anzahl der Beobachtungen |
|-----------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|----------|--------------------------|
| | | | az [°/s] | el [°/s] | |
| 16 | 60 | 12 | 4.8 | 1.1 | 69 708 |

Tab. 5.4-2: Parameter des MCS, verwendete Software für die Analyse und Parameter des Kalman Filters.

| | |
|--------------------------------------|--|
| VLBI-Stationsuhren | ASD $1 \cdot 10^{-14}$ @ 50 min, <i>random walk + integrated random walk</i> |
| weißes Rauschen | 4 ps/Basislinie |
| Software | OCCAM 6.2 SIM |
| <i>variance rates</i> für ZWD | 0.7 ps ² /s |
| <i>variance rates</i> für Gradienten | 0.5 ps ² /s |

5.4.1 Änderung des Cn-Wertes

Der MCS erzeugt jeweils 25 Realisierungen eines VLBI-Experiments mit 3 verschiedenen Werten für Cn (Tab. 5.4-3). Als vergleichende Parameter werden die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten, die RMS-Werte der 3D-Stationsposition und ihrer Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten sowie deren Medianwerte als Qualitätskriterium, herangezogen.

Tab. 5.4-3: Verschiedene Cn-Werte für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell und die Medianwerte des RMS für die 3D-Stationsposition sowie deren Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten (Up, North und East).

| Cn [$10^{-7} \text{ m}^{(-1/3)}$] | 0.5 | 1 | 2 |
|-------------------------------------|-----|-----|-----|
| median 3D RMS [mm] | 1.0 | 1.3 | 2.1 |
| median Up RMS [mm] | 0.9 | 1.2 | 1.9 |
| median North RMS [mm] | 0.2 | 0.4 | 0.6 |
| median East RMS [mm] | 0.2 | 0.3 | 0.5 |

Die Darstellung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten in Abb. 5-16 zeigt eine sehr deutliche Abhängigkeit von der Wahl des Cn-Wertes. Je höher der Cn-Wert gewählt wird, desto schlechter wird die Wiederholbarkeit der Basislinien.

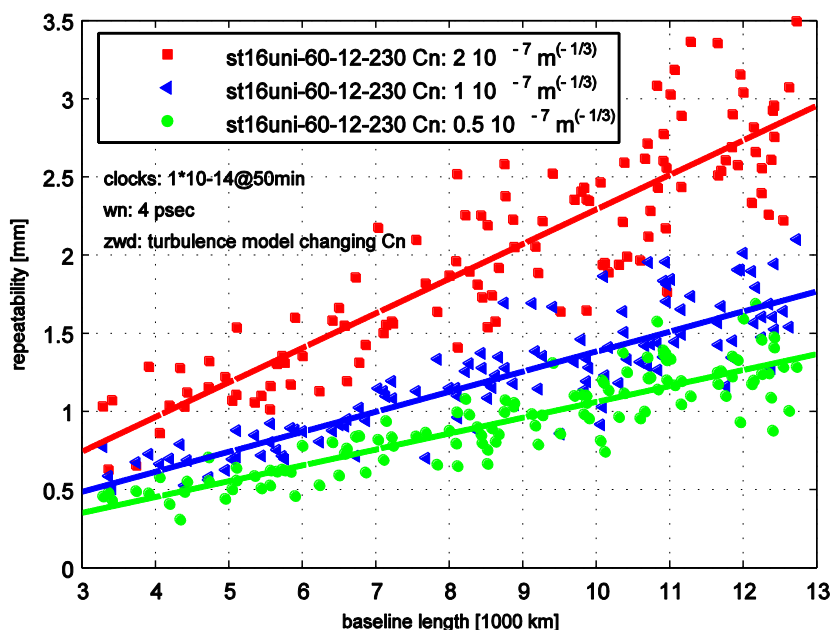


Abb. 5-16: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den 16 Stationen *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell wurden Cn-Werte von 0.5 (grün), 1 (blau) und $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ (rot) verwendet.

Die Abb. 5-17 bis Abb. 5-20 zeigen die RMS-Werte der 3D-Stationsposition und ihrer Komponenten in Vertikal-, Nord- und Ostrichtung (*Up*, *North*, *East*). Eine deutliche Abhängigkeit der Genauigkeit der Positionsbestimmung von der Wahl der Größe der Cn-Werte für die Simulation der Atmosphäre ist ersichtlich.

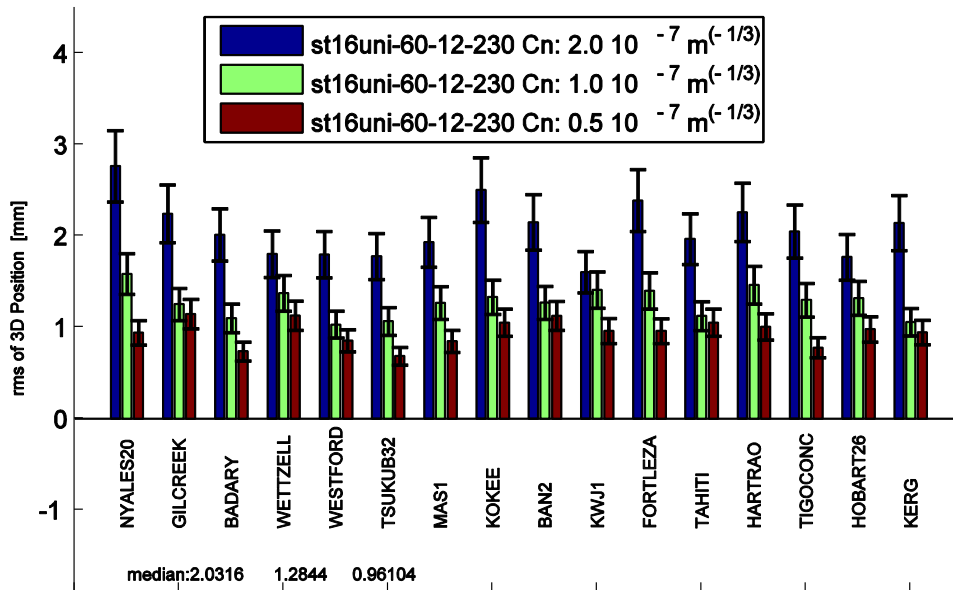


Abb. 5-17: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell wurden Cn-Werte von 0.5 (braun), 1 (grün) und $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ (blau) verwendet.

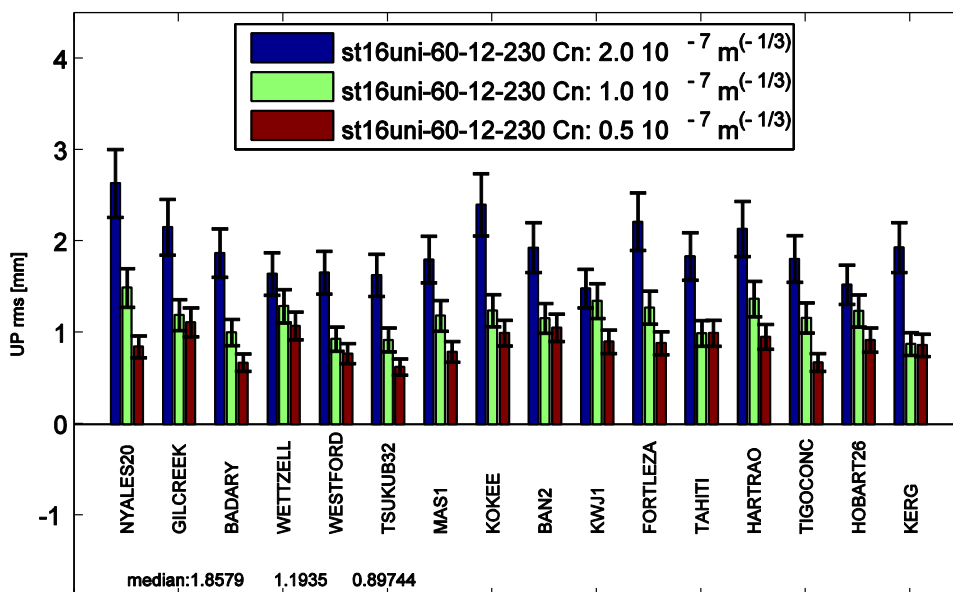


Abb. 5-18: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell wurden Cn-Werte von 0.5 (braun), 1 (grün) und $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ (blau) verwendet.

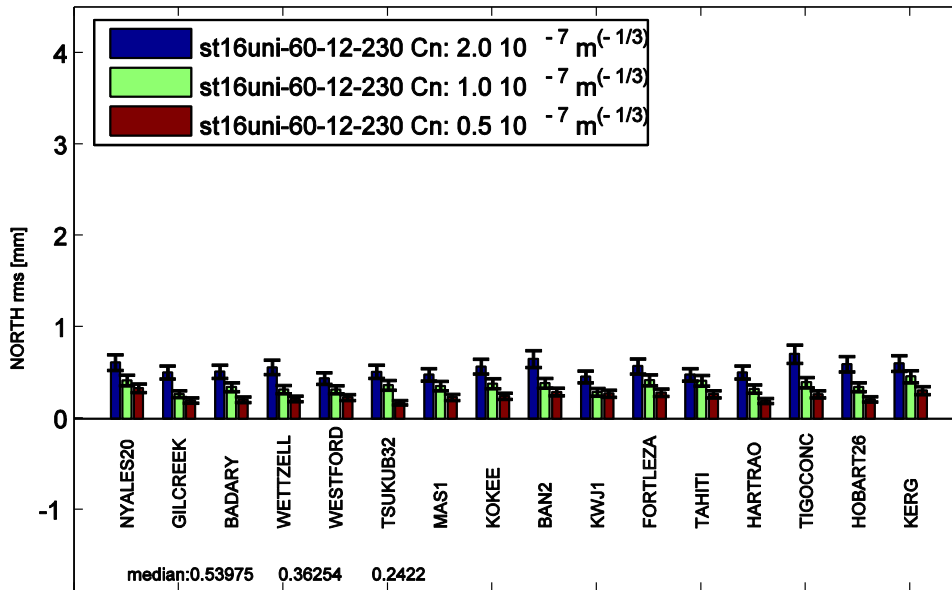


Abb. 5-19: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell wurden Cn-Werte von 0.5 (braun), 1 (grün) und $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ (blau) verwendet.

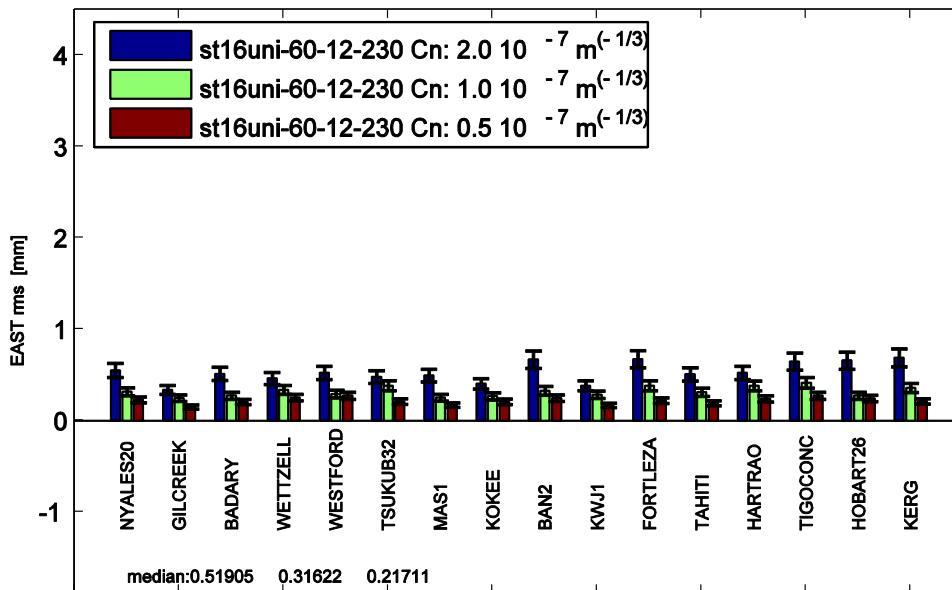


Abb. 5-20: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell wurden Cn-Werte von 0.5 (braun), 1 (grün) und $2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ (blau) verwendet.

5.4.2 Änderung der Höhe der feuchten Atmosphäre

Im folgenden Schritt wird die Höhe der feuchten Atmosphäre geändert. Für die Parameter C_n und Windgeschwindigkeit werden die Standardwerte (Kapitel 5.4) verwendet.

Tab. 5.4-4: Verschiedene Höhen der feuchten Atmosphäre für deren Simulation mit dem Vienna Turbulenzmodell und die Medianwerte des RMS für die 3D-Stationenposition sowie deren Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten (Up, North und East).

| H [km] | 1 | 2 | 3 |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| median 3D RMS [mm] | 1.0 | 1.3 | 1.7 |
| median Up RMS [mm] | 0.8 | 1.2 | 1.6 |
| median North RMS [mm] | 0.2 | 0.4 | 0.5 |
| median East RMS [mm] | 0.3 | 0.3 | 0.4 |

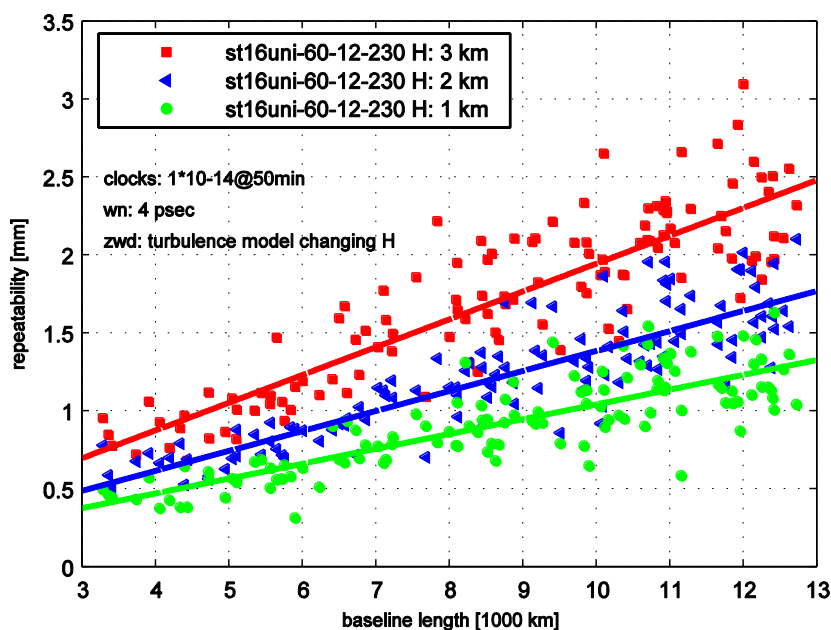


Abb. 5-21: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den 16 Stationen *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und einer Höhe der feuchten Atmosphäre von 1 (grün), 2 (blau) und 3 km (rot) simuliert.

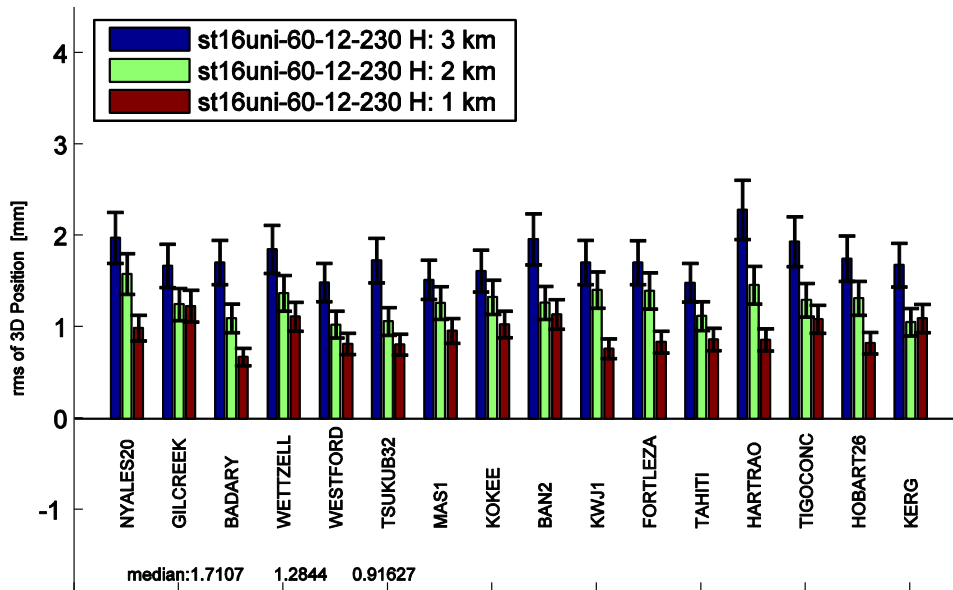


Abb. 5-22: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und einer Höhe der feuchten Atmosphäre von 1 (braun), 2 (grün) und 3 km (blau) simuliert.

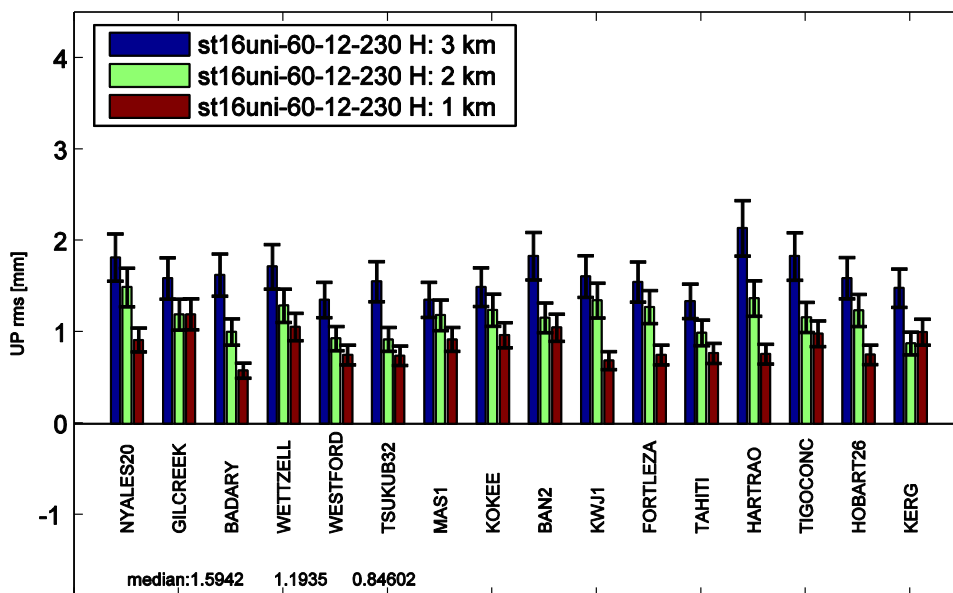


Abb. 5-23: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und einer Höhe der feuchten Atmosphäre von 1 (braun), 2 (grün) und 3 km (blau) simuliert.

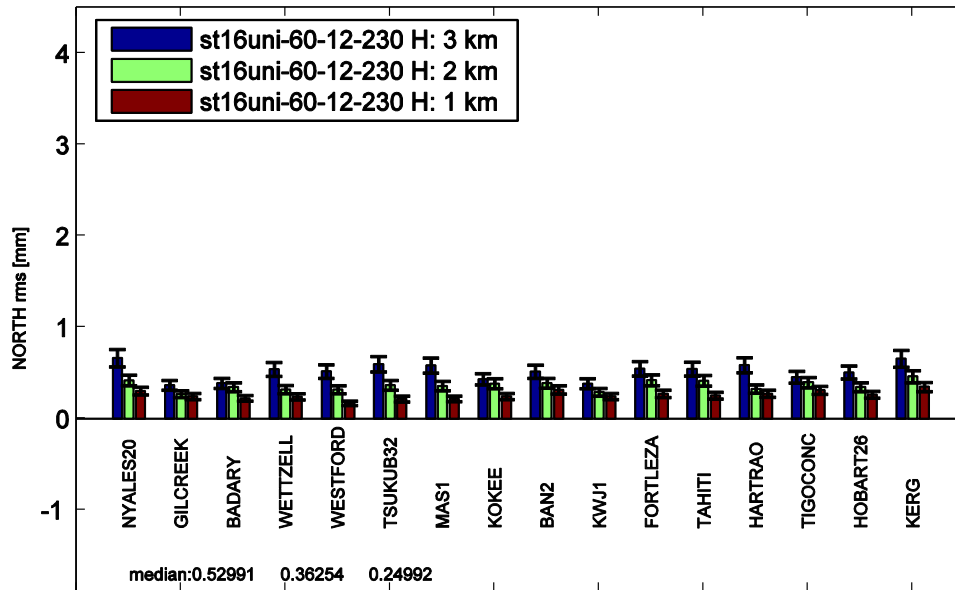


Abb. 5-24: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre ist mit dem Vienna Turbulenzmodell und einer Höhe der feuchten Atmosphäre von 1 (braun), 2 (grün) und 3 km (blau) simuliert.

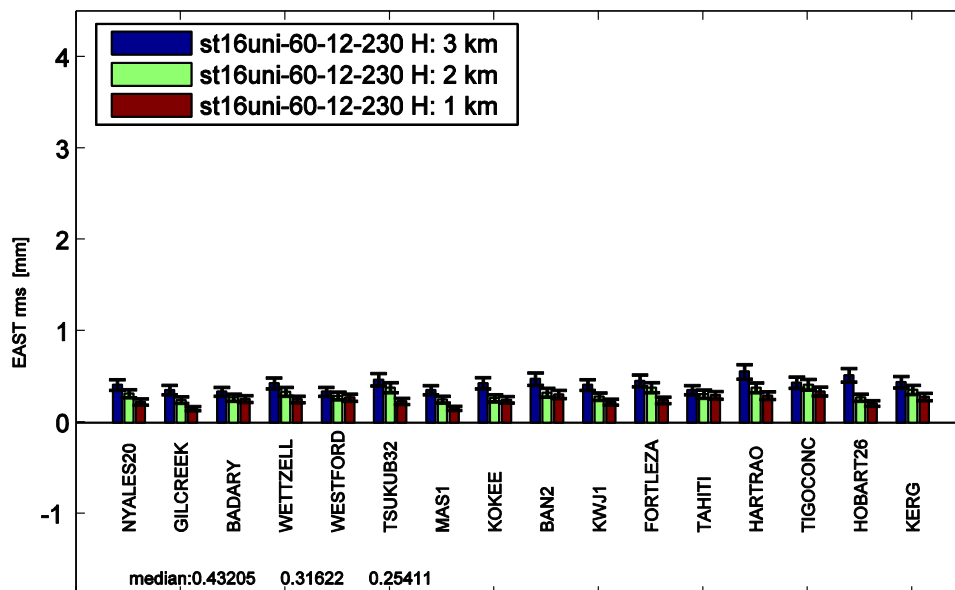


Abb. 5-25: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und einer Höhe der feuchten Atmosphäre von 1 (braun), 2 (grün) und 3 km (blau) simuliert.

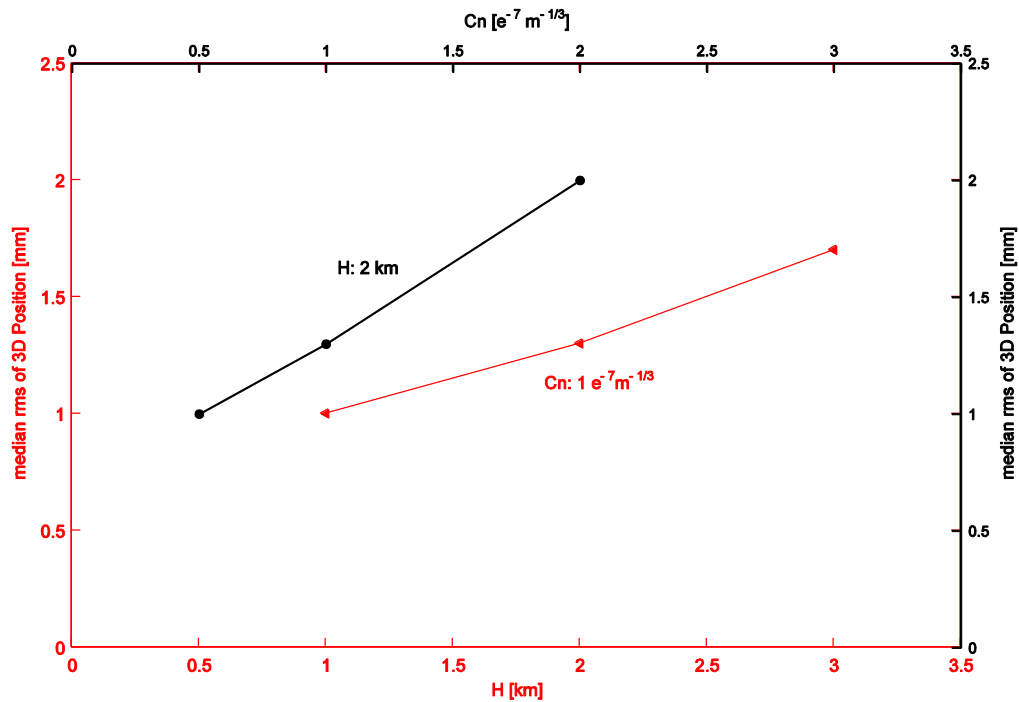


Abb. 5-26: Zusammenfassung der Abhängigkeit des Medianwertes der 3D-Stationenposition bei der Änderung des Cn-Wertes und der Änderung der Höhe der feuchten Atmosphäre H.

Um den Einfluss der Parameter H und Cn (Kapitel 5.4.1) deutlich darstellen zu können, sind die Änderung des Medians der 3D-Positionsgenauigkeit, bei verschiedenen Werten für die Höhe H, in rot, sowie verschiedenen Cn-Werten, in schwarz, in einer Abbildung zusammengefasst (Abb. 5-26).

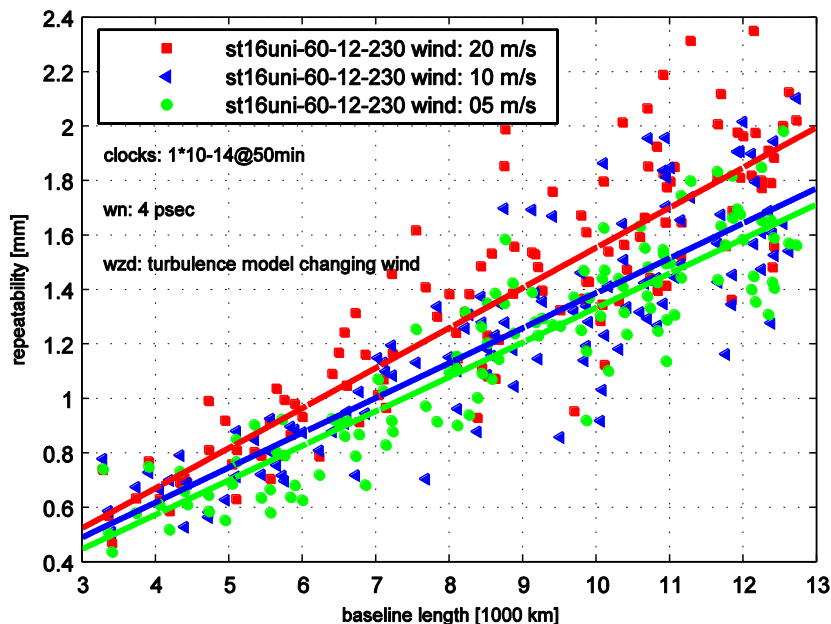
5.4.3 Änderung der Windgeschwindigkeit

Nach der Änderung der C_n -Werte (Kapitel 5.4.1) und der Höhe H (Kapitel 5.4.2) werden C_n und H auf Standardwerte fixiert und der Einfluss der Änderung der Windgeschwindigkeit untersucht. Die Windgeschwindigkeit wird mit 5, 10 und 20 m/s in Richtung Osten variiert und die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit sowie die 3D-Positionsgenauigkeit werden analysiert.

Tab. 5.4-5: Verschiedene Windgeschwindigkeiten für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell und die Medianwerte des RMS für die 3D-Stationsposition sowie deren Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten (*Up*, *North* und *East*).

| wind [m/s] | 5 | 10 | 20 |
|--------------------------------------|-----|-----|-----|
| C_n [$10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$] | 1 | 1 | 1 |
| H [km] | 2 | 2 | 2 |
| median 3D RMS [mm] | 1.2 | 1.3 | 1.4 |
| median Up RMS [mm] | 1.1 | 1.2 | 1.3 |
| median North RMS [mm] | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| median East RMS [mm] | 0.3 | 0.3 | 0.4 |

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten zeigen einen geringeren Einfluss der Änderung des Windes, als dies in den vorigen Kapiteln bei Änderung der Parameter C_n und H der Fall war. Es ist eine leichte Verbesserung mit geringerer Windgeschwindigkeit zu erkennen. Der Wind hat also keinen dominanten Einfluss auf die Simulation der Atmosphäre.



5-27: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den 16 Stationen *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 5 (grün), 10 (blau) und 20 m/s (rot) in Richtung Osten simuliert.

In den Medianwerten der 3D-Stationspositionen ist die geringe Auswirkung einer Änderung der Windgeschwindigkeiten sehr deutlich zu sehen.

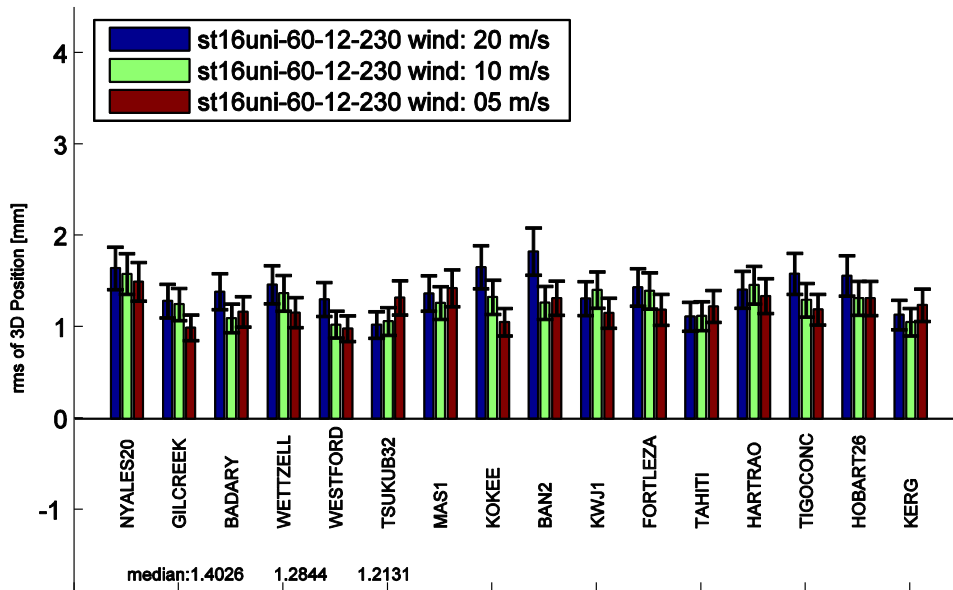


Abb. 5-28: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert.

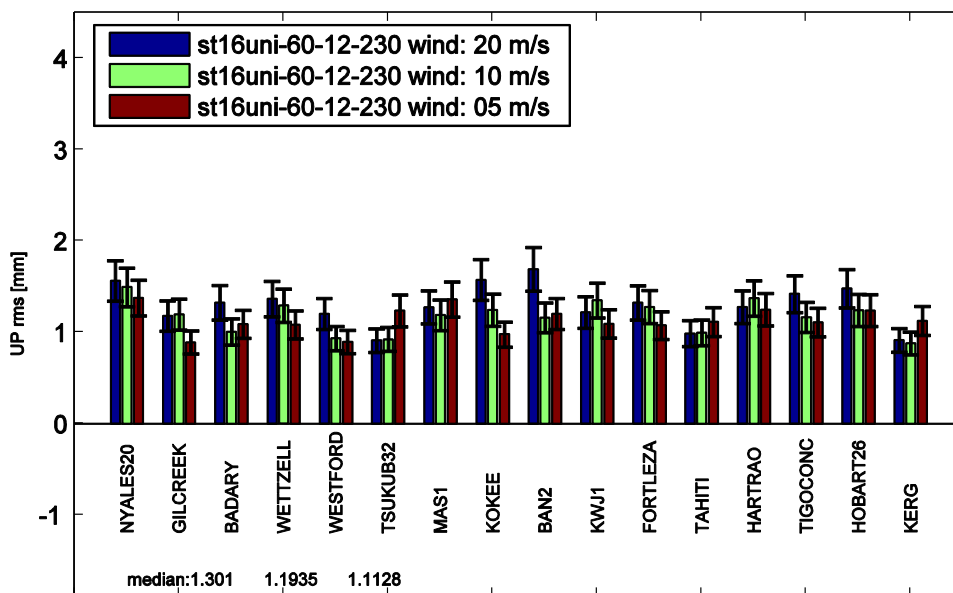


Abb. 5-29: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert.

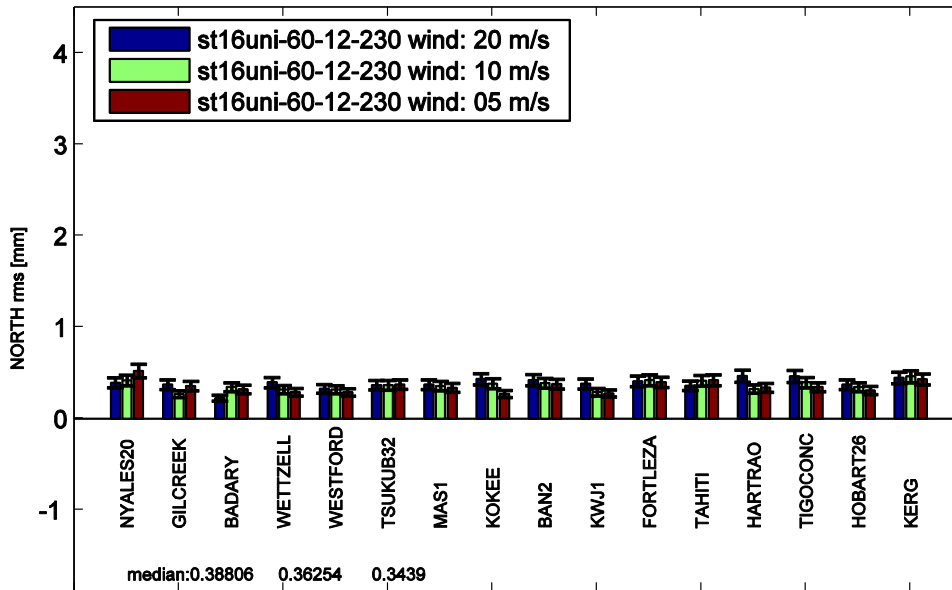


Abb. 5-30: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert.

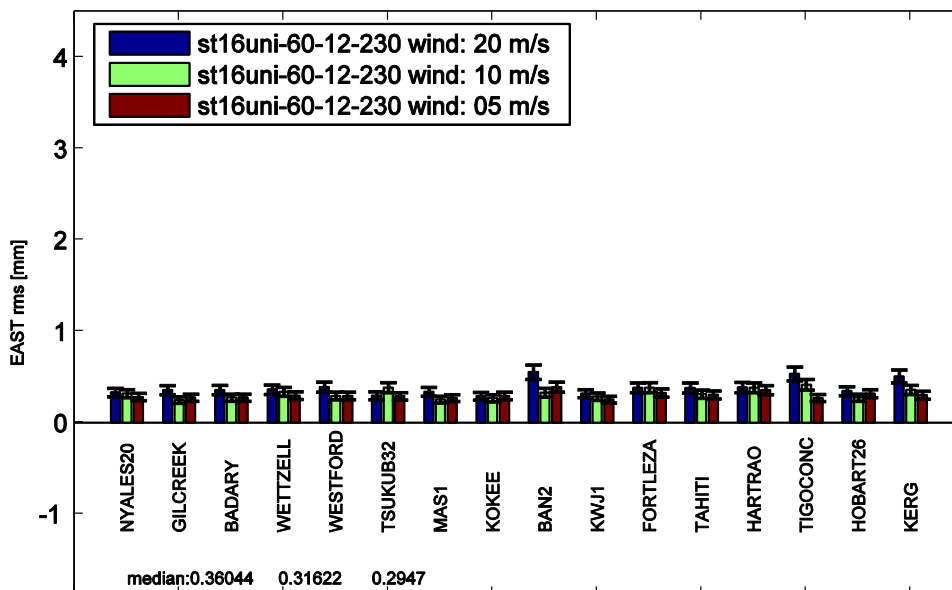


Abb. 5-31: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert.

Der Einfluss des Windes auf die VLBI-Ergebnisse ändert sich bei verschiedenen Werten für die Parameter C_n und H auch unterschiedlich. Kann man aus der vorhergehenden Untersuchung durchaus den Schluss ziehen, dass sich der Median der 3D-Stationsposition mit zunehmender Windgeschwindigkeit verschlechtert, so trifft das für extrem hohe Werte für C_n und H nicht zu. Für den folgenden Vergleich ist das Vienna Turbulenzmodell mit $C_n = 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$, und $H = 4 \text{ km}$, berechnet. Diese extremen Werte liegen über den Maximalwerten der in Tab. 5.2-1 zusammengefassten Werte für C_n und H , die für die Untersuchungen des V2C verwendet wurden. Bei diesen Extremwerten ist der umgekehrte Einfluss der Windgeschwindigkeit als bei Verwendung der Standardwerte für C_n und H erkennbar. Bei Zunahme der Windgeschwindigkeit verbessern sich die Medianwerte des RMS der 3D-

Stationsposition deutlich. Ein weiterer Vergleich schließt die Maximalwerte für C_n und H , die in dieser Arbeit und in den Untersuchungen des V2C verwendet wurden, ein, $C_n = 2.5 \cdot 10^{-7} m^{-1/3}$ und $H = 2.5$ km. Für diese Simulation des ZWD wird eine Verbesserung des Medianwertes des RMS der 3D-Stationsposition bei einem mittleren Wind von 10 m/s gefunden. Erhöht oder verringert man die Windgeschwindigkeit so verschlechtert sich auch der Medianwert des RMS der 3D-Stationsposition. Die Ergebnisse der Berechnungen mit verschiedenen C_n und H sind in Tab. 5.4-6 für die 3D-Stationsposition und die Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten dargestellt. Abb. 5-32 fasst die Ergebnisse von Tab. 5.4-6 graphisch zusammen und verdeutlicht den Effekt des Einflusses der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit verschiedener Werte für C_n und H auf die Simulation der feuchten Atmosphäre und folglich auch die Medianwerte des RMS der 3D-Stationsposition.

Tab. 5.4-6: Verschiedene Windgeschwindigkeiten für die Simulation der Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell für verschiedene Kombinationen von C_n und H . Die Medianwerte des RMS der 3D-Stationsposition und deren Vertikal-, Nord- und Ostkomponenten (Up, North und East) sind angeführt.

| wind [m/s] | 5 | 10 | 20 | 5 | 10 | 20 | 5 | 10 | 20 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| $C_n [10^{-7} m^{-1/3}]$ | 1 | 1 | 1 | 3.5 | 3.5 | 3.5 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| H [km] | 2 | 2 | 2 | 4 | 4 | 4 | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| median 3D RMS [mm] | 1.2 | 1.3 | 1.4 | 8.9 | 8.4 | 7.7 | 3.3 | 3.2 | 3.6 |
| median Up RMS [mm] | 1.1 | 1.2 | 1.3 | 8.2 | 7.7 | 7.1 | 3.1 | 3.0 | 3.3 |
| median North RMS [mm] | 0.3 | 0.4 | 0.4 | 2.9 | 2.3 | 2.1 | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| median East RMS [mm] | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 2.1 | 1.8 | 2.0 | 0.7 | 0.8 | 0.9 |

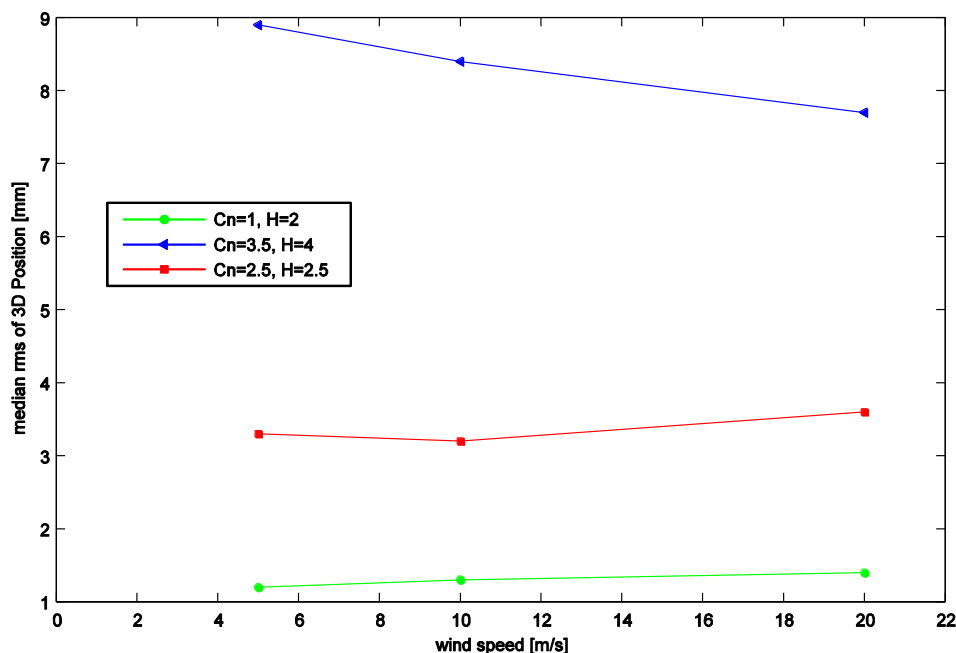


Abb. 5-32: Zusammenfassung der Abhängigkeit des Medianwertes der 3D-Stationsposition von der Änderung des Windes für verschiedene Werte von C_n und H .

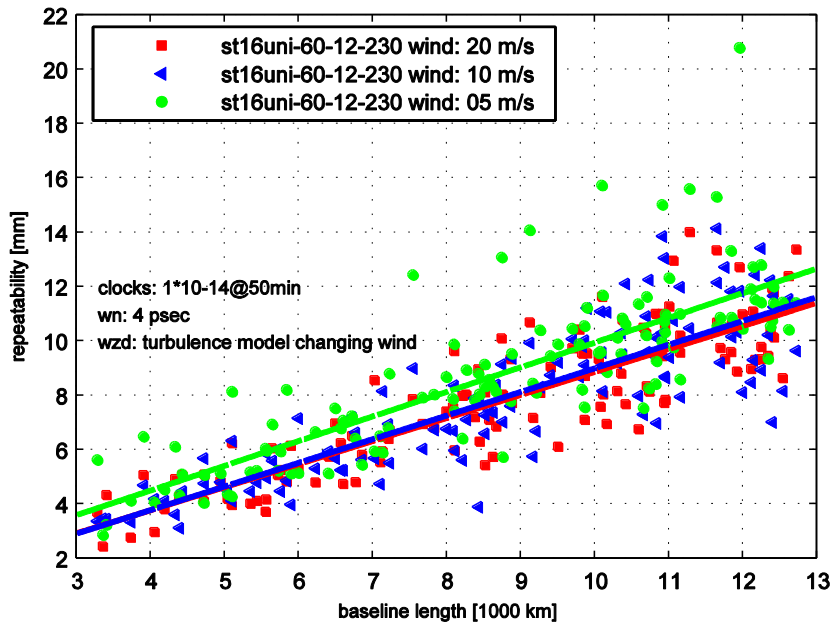


Abb. 5-33: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den 16 Stationen *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 5 (grün), 10 (blau) und 20 m/s (rot) in Richtung Osten simuliert, $C_n = 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ und $H = 4 \text{ km}$.

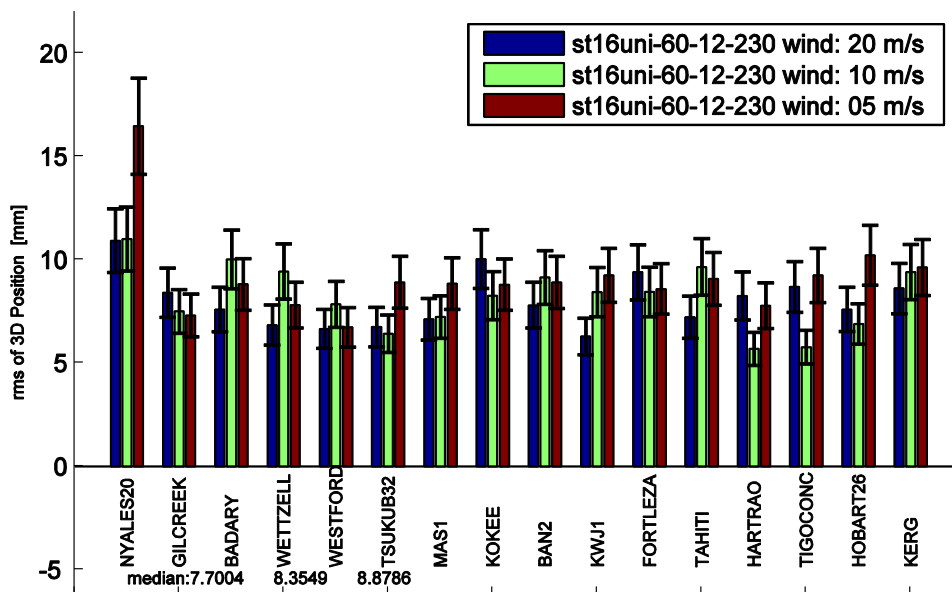


Abb. 5-34: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert, $C_n = 3.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ und $H = 4 \text{ km}$.

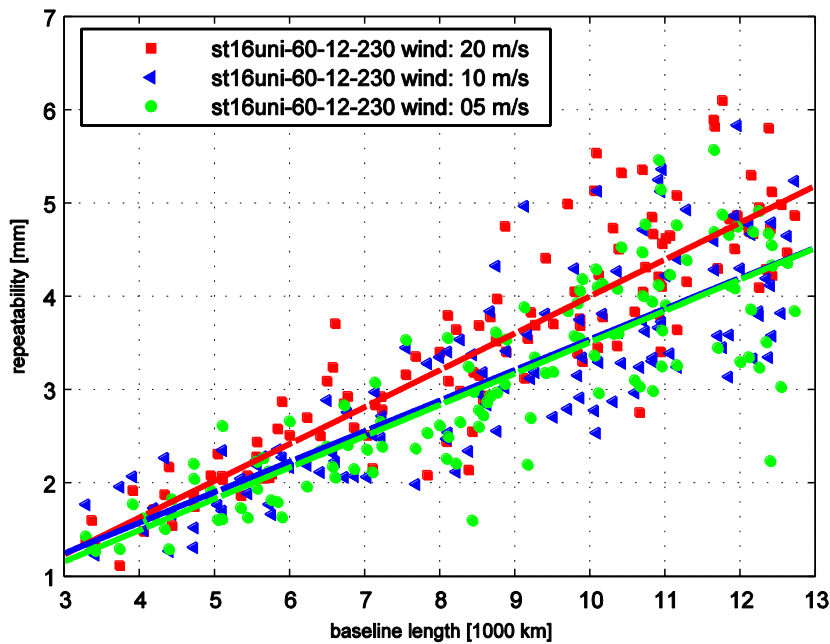


Abb. 5-35: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 5 (grün), 10 (blau) und 20 m/s (rot) in Richtung Osten simuliert, $C_n = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ und $H = 2.5 \text{ km}$.

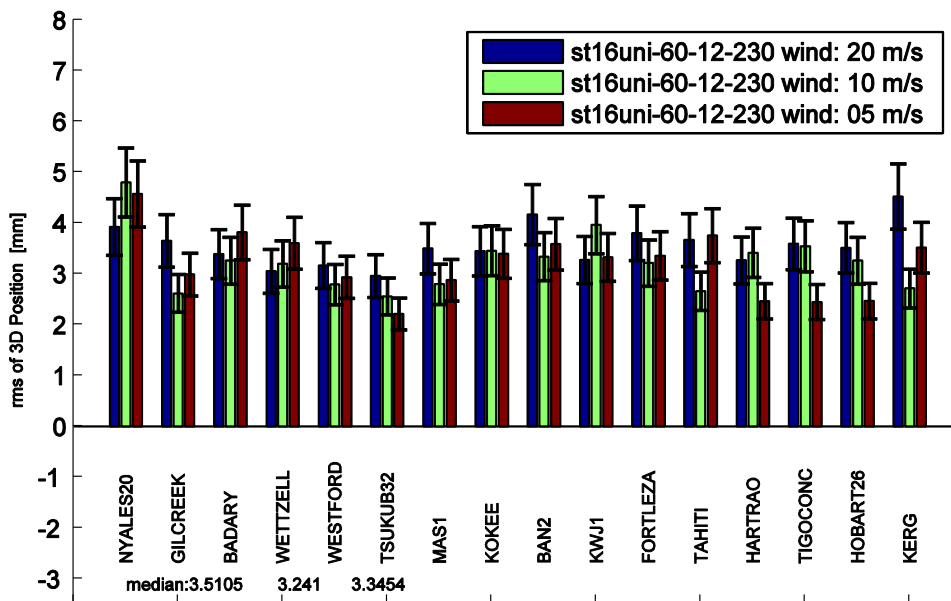


Abb. 5-36: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die Atmosphäre wurde mit dem Vienna Turbulenzmodell und Windgeschwindigkeiten von 20 (blau), 10 (grün) und 5 m/s (braun) in Richtung Osten simuliert, $C_n = 2.5 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$ und $H = 2.5 \text{ km}$.

5.5 Einfluss der Uhrenparameter und des weißen Rauschens auf den MCS bei Verwendung des Turbulenzmodells

Der Einfluss der Uhrenparameter wurde als eine erste Abschätzung in Kapitel 5.1.3 beschrieben. Diese Erkenntnisse beruhen auf einem MCS, der die feuchte Atmosphäre durch einen *random walk*, nicht stationsabhängig, modelliert. Eines der Hauptprobleme in der VLBI-Analyse ist die Trennung der Schätzwerte für die VLBI-Stationsuhren und des Anteils der feuchten Atmosphäre. Aufgrund der hohen Korrelation der beiden Parameter wird in diesem Kapitel der Einfluss der VLBI-Stationsuhren auf die Ergebnisse der VLBI-Analyse erneut unter Verwendung des in Kapitel 5.2 evaluierten Vienna Turbulenzmodells durchgeführt. Grundlage für diese Untersuchung ist das VLB2010-Testnetzwerk mit 16 Stationen und der Beobachtungsplan mit gleichmäßiger Quellenverteilung, *uniform sky*, mit einem Beobachtungsintervall von 60 s und insgesamt 69 708 Beobachtungen. Die Antennendrehgeschwindigkeit für jede der 16 VLBI-Antennen entspricht dabei 4.8 °/s in Azimut und 1.1 °/s in Elevation. Die verwendeten stationsabhängigen Parameter Cn, H und Windgeschwindigkeit, die für die Modellierung der feuchten Atmosphäre mit dem Vienna Turbulenzmodell verwendet werden, sind in Tab. 5.5-1 angeführt.

Tab. 5.5-1: Cn, H und Windgeschwindigkeit in Nord- und Ostrichtung für das Vienna Turbulenzmodell.

| Station | Cn [$10^{-7}\text{m}^{-1/3}$] | H [km] | v Nord [m/s] | v Ost [m/s] |
|----------|------------------------------------|-----------|-----------------|----------------|
| BADARY | 0.86 | 1815 | 0.25 | 4.74 |
| BAN2 | 2.47 | 1679 | 3.46 | -2.2 |
| FORTLEZA | 2.47 | 2142 | 2.93 | -7.12 |
| GILCREEK | 0.55 | 1963 | 3.8 | -6.49 |
| HARTRAO | 2.03 | 1851 | 2.03 | -2.84 |
| HOBART26 | 1.16 | 2043 | 3.03 | 11.14 |
| KERG | 0.93 | 2089 | 3.4 | 17.5 |
| KOKEE | 2.3 | 1779 | 4.38 | -3.36 |
| KWJ1 | 2.47 | 1629 | -1.64 | -9.42 |
| MAS1 | 2.47 | 1877 | 1.13 | -4.87 |
| NYALES20 | 0.35 | 1845 | 7.46 | 0.53 |
| TAHITI | 2.47 | 2078 | 5.45 | -1.17 |
| TIGOCONC | 1.41 | 2176 | 1.21 | 4.96 |
| TSUKUB32 | 1.45 | 1912 | 1.03 | 10.49 |
| WESTFORD | 1.17 | 2269 | 5.39 | 11.88 |
| WETTZELL | 0.94 | 1856 | 6.75 | 4.22 |

Für die unterschiedlichen Simulationen der VLBI-Stationsuhr werden fünf verschiedene ASD verwendet (Tab. 5.5-2). Die erzeugte Zeitreihe des simulierten feuchten Anteils der Atmosphäre sowie die generierte Zeitreihe des weißen Rauschens (4 ps) sind für alle verwendeten Uhrenparameter ident. Die VLBI-Stationsuhren werden mittels *random walk plus integrated random walk* (Kapitel 4.1.2) simuliert.

Die VLBI-Analyse zeigt beim Betrachten der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten (Abb. 5-37), dass die Änderung der Genauigkeit der VLBI-Uhren mit einer ASD von $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min

bis zu der VLBI2010-Standarduhr mit $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min kaum Einfluss auf die Ergebnisse der VLBI-Lösungen nehmen. Anders ausgedrückt, kann man auch sagen, dass für Uhren die eine bessere ASD als $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min aufweisen, der Einfluss der Atmosphäre größer ist als der Einfluss der VLBI-Stationsuhren. Eine deutliche Verschlechterung der Basislinien Wiederholbarkeiten sieht man bereits bei einer Uhr mit einer ASD von $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min und noch deutlicher wird es bei einer Uhr von $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min.

Tab. 5.5-2: Verschiedene ASD für die Simulation der VLBI-Stationsuhren und die Medianwerte der 3D- Stationsposition der VLBI-Auswertung.

| ASD [@50min] | $5 \cdot 10^{-14}$ | $2 \cdot 10^{-14}$ | $1 \cdot 10^{-14}$ (V2C) | $5 \cdot 10^{-15}$ | $1 \cdot 10^{-15}$ |
|-----------------------|--------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|--------------------|
| median 3D RMS [mm] | 3.9 | 2.1 | 1.5 | 1.4 | 1.3 |
| median Up RMS [mm] | 3.6 | 1.9 | 1.4 | 1.3 | 1.2 |
| median North RMS [mm] | 1.1 | 0.6 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| median East RMS [mm] | 1.0 | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 0.3 |

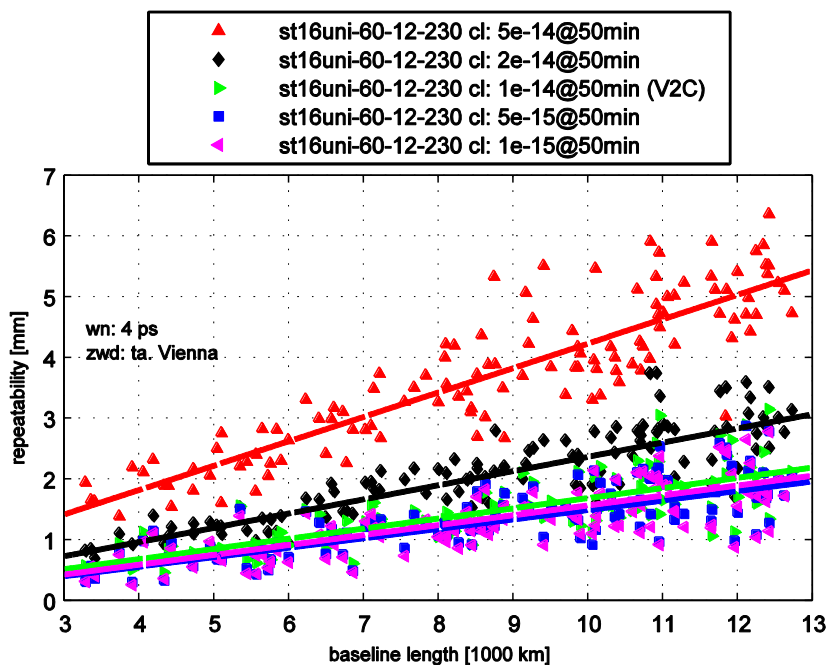


Abb. 5-37: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s und 16 VLBI-Stationen. Die VLBI-Stationsuhren wurden mit unterschiedlichen ASD simuliert: $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min (rot), $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min (schwarz), $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C) (grün), $5 \cdot 10^{-15}$ @50 min (blau), $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min (magenta).

Betrachtet man die 3D-Stationsposition, so kann man den gleichen Effekt beobachten, der sich bei der Auswertung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten erkennen lässt. Mit Hilfe der Medianwerte des RMS der 3D-Stationsposition (Tab. 5.5-2) kann man den Einfluss der verschiedenen VLBI-Stationsuhren klar darstellen. Die 3D-Stationspositionen und deren Vertikal- (Up), Nord- (North) und Ostkomponenten (East) sind für jede einzelne der 16 VLBI-Stationen des Testnetzwerks in Abb. 5-38 bis Abb. 5-41 abgebildet.

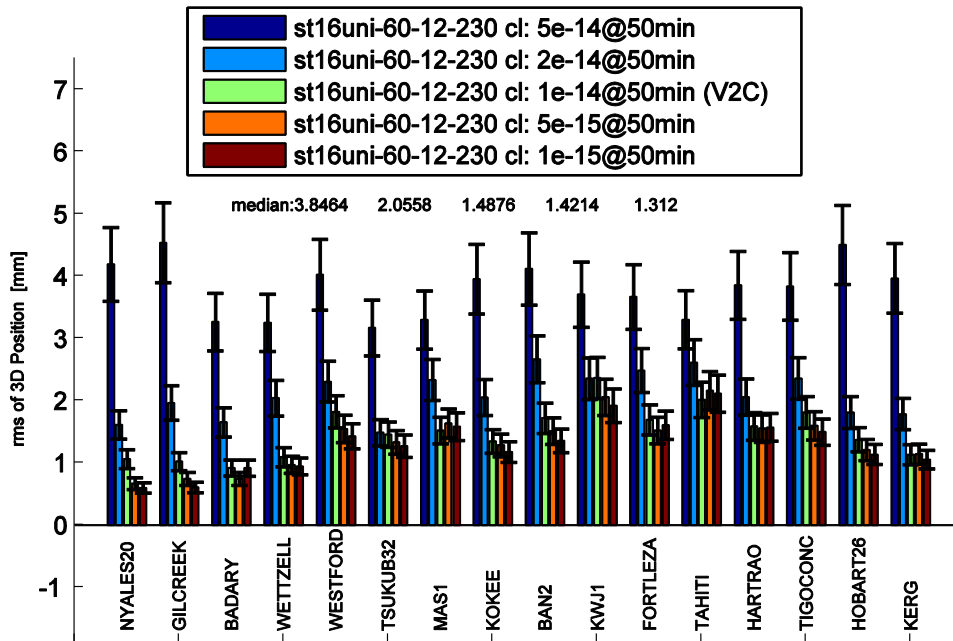


Abb. 5-38: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die VLBI-Stationsuhren wurden mit unterschiedlichen ASD simuliert: $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min (dunkelblau), $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min (blau), $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C, grün), $5 \cdot 10^{-15}$ @50 min (orange), $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min (braun).

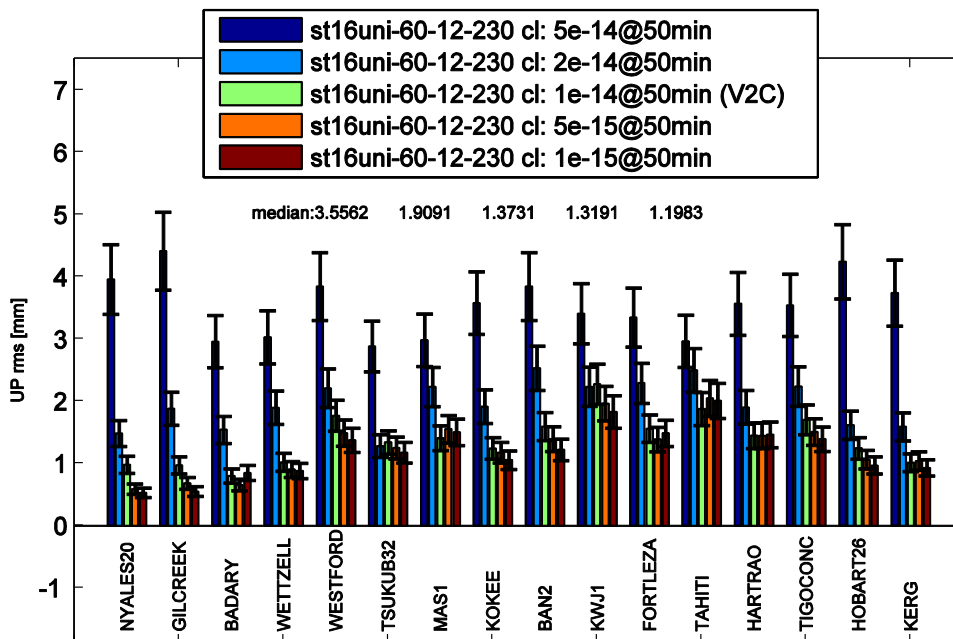


Abb. 5-39: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die VLBI-Stationsuhren wurden mit unterschiedlichen ASD simuliert: $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min (dunkelblau), $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min (blau), $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C, grün), $5 \cdot 10^{-15}$ @50 min (orange), $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min (braun).

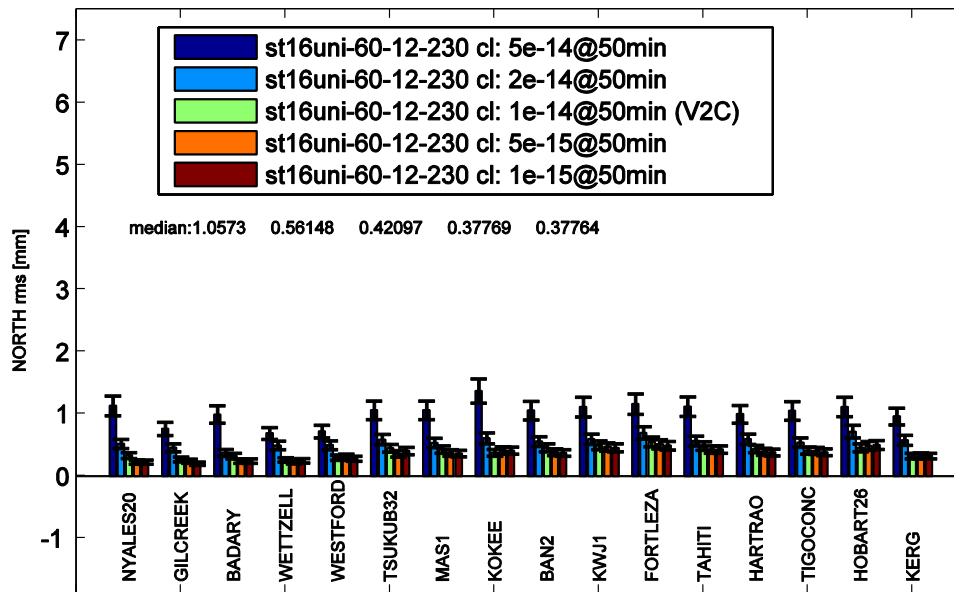


Abb. 5-40: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die VLBI-Stationsuhren wurden mit unterschiedlichen ASD simuliert: $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min (dunkelblau), $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min (blau), $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C, grün), $5 \cdot 10^{-15}$ @50 min (orange), $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min (braun).

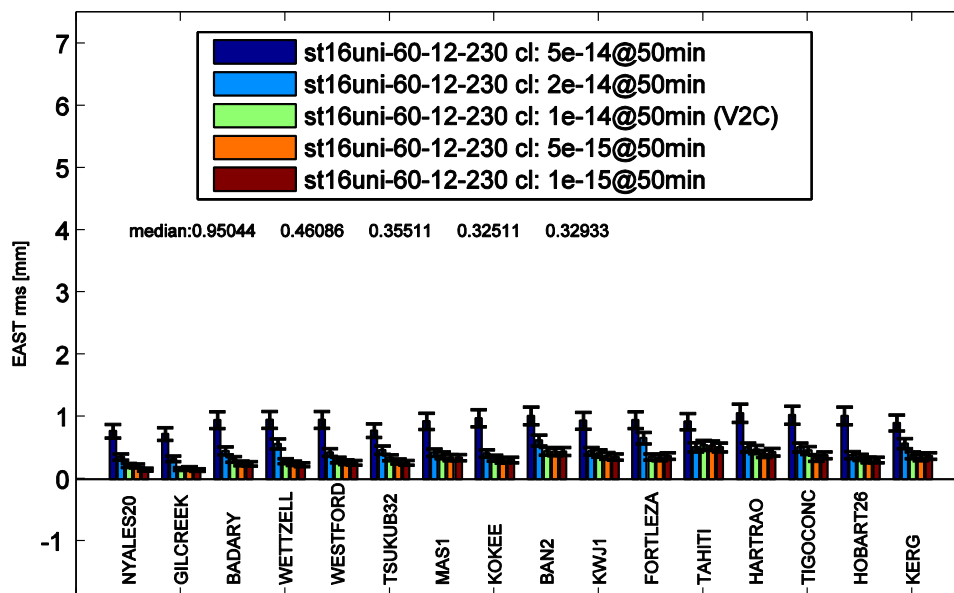


Abb. 5-41: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Die VLBI-Stationsuhren wurden mit unterschiedlichen ASD simuliert: $5 \cdot 10^{-14}$ @50 min (dunkelblau), $2 \cdot 10^{-14}$ @50 min (blau), $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C, grün), $5 \cdot 10^{-15}$ @50 min (orange), $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min (braun).

Der Einfluss des weißen Rauschens wurde in Kapitel 5.1.2 bereits untersucht. Dabei wurde der Anteil der feuchten Atmosphäre lediglich mit dem physikalisch sehr einfachen Modell des *random walk* (Kapitel 4.1.3) simuliert. Das hier verwendete Vienna Turbulenzmodell beschreibt die tatsächlichen Bewegungen und Änderungen in der Atmosphäre wesentlich realistischer als das stationsunabhängige Modell des *random walk*.

Die hier berechneten Simulationen verwenden eine VLBI-Stationsuhr mit einer ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min (V2C Standard) und das Vienna Turbulenzmodell mit den in Tab. 5.5-1 angeführten Parametern. Ausgehend davon, wird die Höhe des weißen Rauschens geändert (Tab. 5.5-3) und damit der Beobachtungsfehler für jede beobachtete Basislinie verändert. Diese

Änderung beschreibt die Größenordnung der Änderung der Genauigkeit des gesamten VLBI-Empfangssystems. Bei tatsächlichen Beobachtungen wie CONT05 beträgt die Standardabweichung des mittleren Beobachtungsfehlers nach der Korrelation 29 ps, und die maximale Standardabweichung rund 120 ps.

Tab. 5.5-3: Verschiedene Werte für das weiße Rauschen und die Medianwerte der 3D-Stationsposition der VLBI-Auswertung.

| weißes Rauschen [ps/bsl] | 4 | 8 | 12 | 16 | 24 | 32 |
|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| median 3D RMS [mm] | 1.5 | 1.5 | 1.6 | 1.7 | 1.7 | 2.1 |
| median Up RMS [mm] | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.6 | 1.6 | 2.0 |
| median North RMS [mm] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.6 | 0.6 |
| median East RMS [mm] | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.5 | 0.5 |

Die ermittelten Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten mit den in Tab. 5.5-3 angeführten Werten für das weiße Rauschen zeigen, dass keine Änderung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit zwischen 4 und 8 ps weißem Rauschen zu erreichen ist. Auch bei einem weißen Rauschen von 12 ps und 16 ps ist die Verbesserung nicht mehr so deutlich zu sehen wie dies in Kapitel 5.1.2 gezeigt ist, in dem der feuchte Anteil der Atmosphäre unter der Verwendung des *random walk* simuliert wurde.

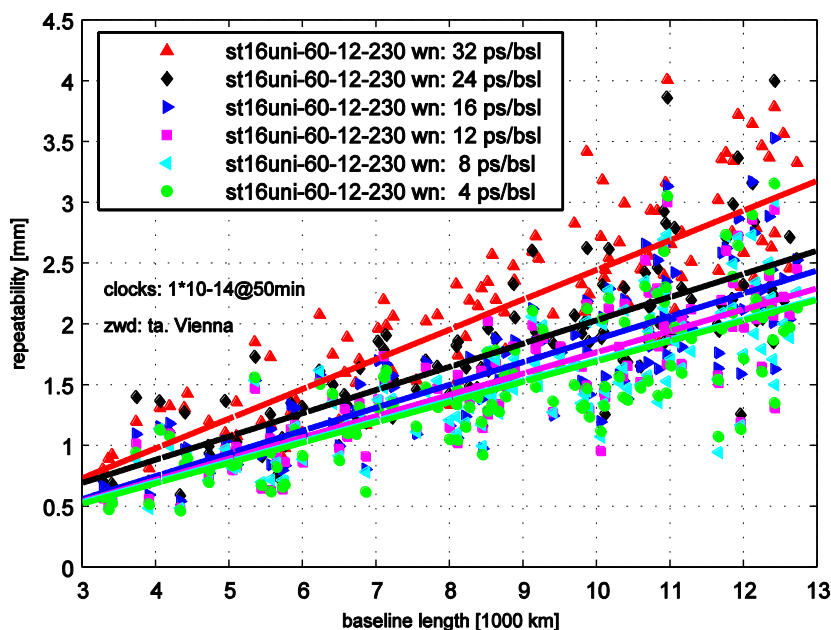


Abb. 5-42: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für den 16 Stationen *uniform sky* Beobachtungsplan mit einem Beobachtungsintervall von 60 s. Das weiße Rauschen wurde mit 32 (rot), 24 (schwarz), 16 (blau), 12 (mangenta), 8 (türkis) und 4 ps (grün) simuliert.

Sehr deutlich zeigt das RMS der 3D-Stationsposition für verschiedenen Niveaus des weißen Rauschens in den Abb. 5-43 bis Abb. 5-46, den Einfluss auf die Gesamtperformance der VLBI-Auswertung. Die Medianwerte für die 3D-Stationsposition und ihrer Vertikal- (Up), Nord- (North) und Ostkomponenten (East) sind in Tab. 5.5-3 angeführt und zeigen deutlich, dass ein weißes Rauschen von 4 ps einen sehr geringen Einfluss auf die VLBI Ergebnisse hat. Alleine durch die Reduktion des Beobachtungsfehlers kann das V2C-Ziel von einer Positionsgenauigkeit von 1mm aber nicht erreicht werden.

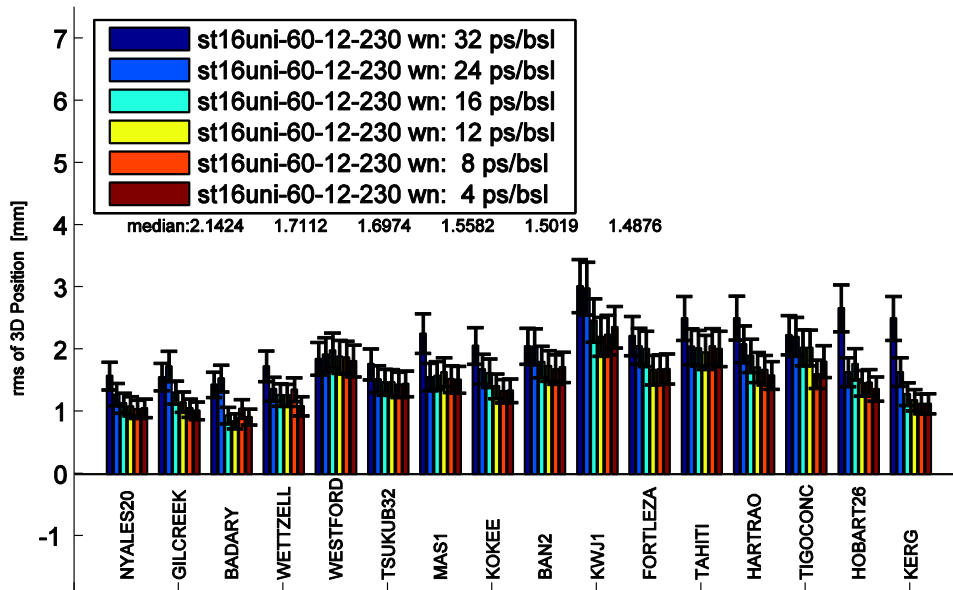


Abb. 5-43: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Das weiße Rauschen wurde mit 32 (blau), 24 (hellblau), 16 (türkis), 12 (gelb), 8 (orange) und 4 ps (braun) simuliert.

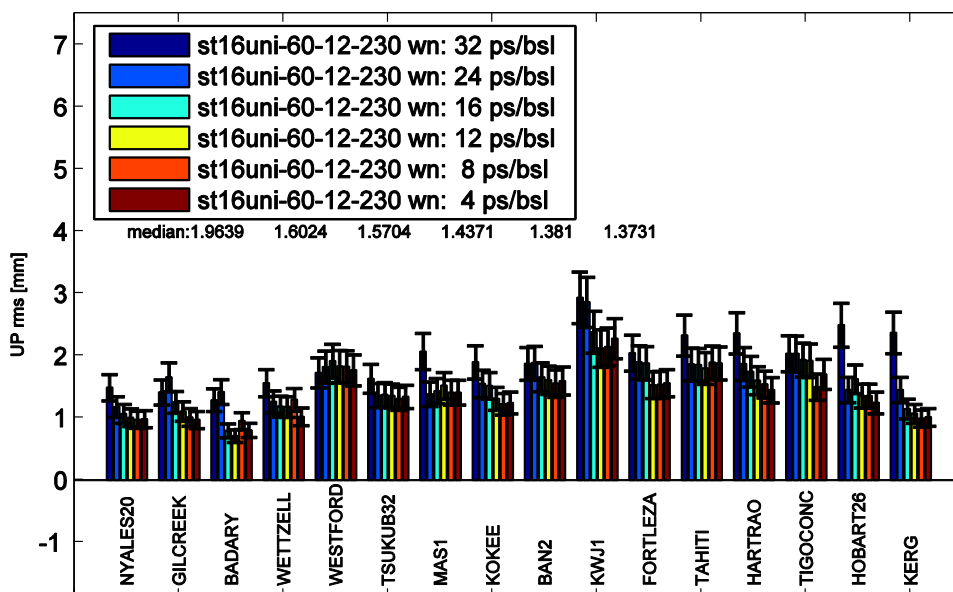


Abb. 5-44: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Das weiße Rauschen wurde mit 32 (blau), 24 (hellblau), 16 (türkis), 12 (gelb), 8 (orange) und 4 ps (braun) simuliert.

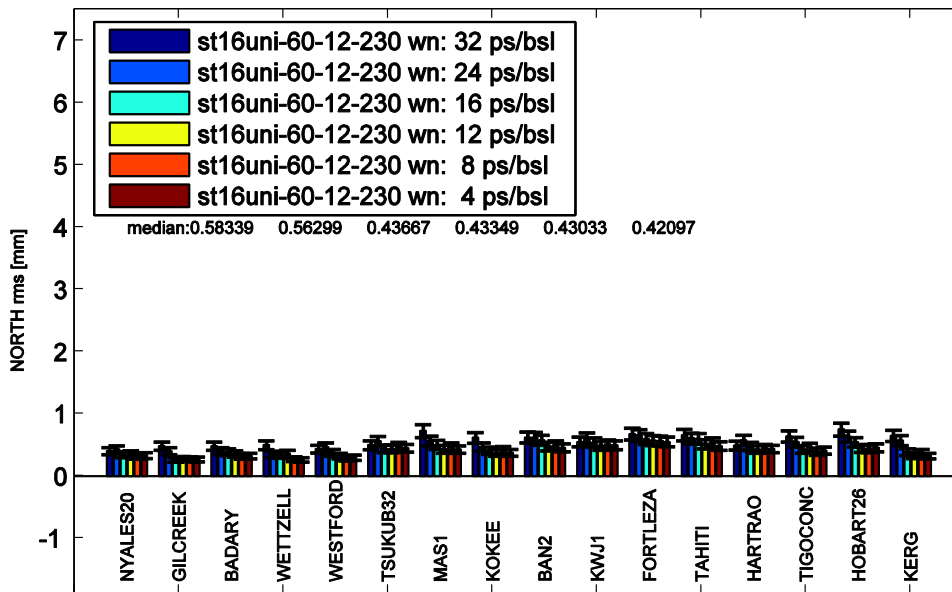


Abb. 5-45: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Das weiße Rauschen wurde mit 32 (blau), 24 (hellblau), 16 (türkis), 12 (gelb), 8 (orange) und 4 ps (braun) simuliert.

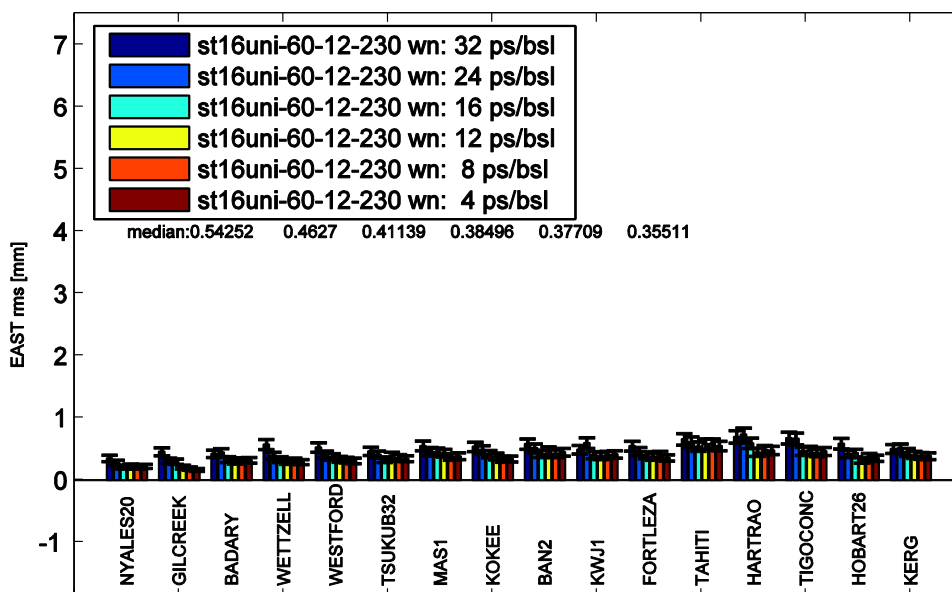


Abb. 5-46: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd. Das weiße Rauschen wurde mit 32 (blau), 24 (hellblau), 16 (türkis), 12 (gelb), 8 (orange) und 4 ps (braun) simuliert.

Zusammenfassend ist in Abb. 5-47 der Einfluss der ASD der VLBI-Stationsuhren (rot) und der Einfluss der Höhe des weißen Rauschens auf den Median der 3D-Stationsposition abgebildet. Es ist sehr deutlich zu erkennen, dass die ASD der VLBI-Stationsuhren von $1 \cdot 10^{-15}$ @50 min bis $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min kaum Einfluss auf die Ergebnisse der VLBI-Auswertung nehmen. Für Uhren mit einer höheren ASD ist die Trennung zwischen Atmosphäre und Stationsuhr schwieriger. Als Standard für das VLBI2010-Beobachtungssystem muss eine VLBI-Stationsuhr eine ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min aufweisen. Diese Aussage basiert auf den Erkenntnissen der Monte-Carlo-Simulation mit dem Vienna Turbulenzmodell zur Modellierung des feuchten Anteils der Atmosphäre und 4 ps weißem Rauschen zur Modellierung des Beobachtungsfehlers pro Basislinie.

Betrachtet man die Medianwerte bei geändertem Niveau des weißen Rauschens (schwarz), so kann man den Einfluss des Beobachtungsfehlers als gering feststellen. Eine Reduktion des Beobachtungsfehlers von 32 auf 4 ps bringt eine Verbesserung des Medianwertes der 3D-Stationenposition von 2.1 mm auf 1.5 mm. Folglich kann man basierend auf der Monte-Carlo-Simulation sagen, dass der Beobachtungsfehler einen geringeren Einfluss auf die VLBI-Ergebnisse hat als die Stationsuhr. Der Richtwert des Beobachtungsfehlers für das VLBI2010-Antennensystem ist folglich $< 8\text{ps}$.

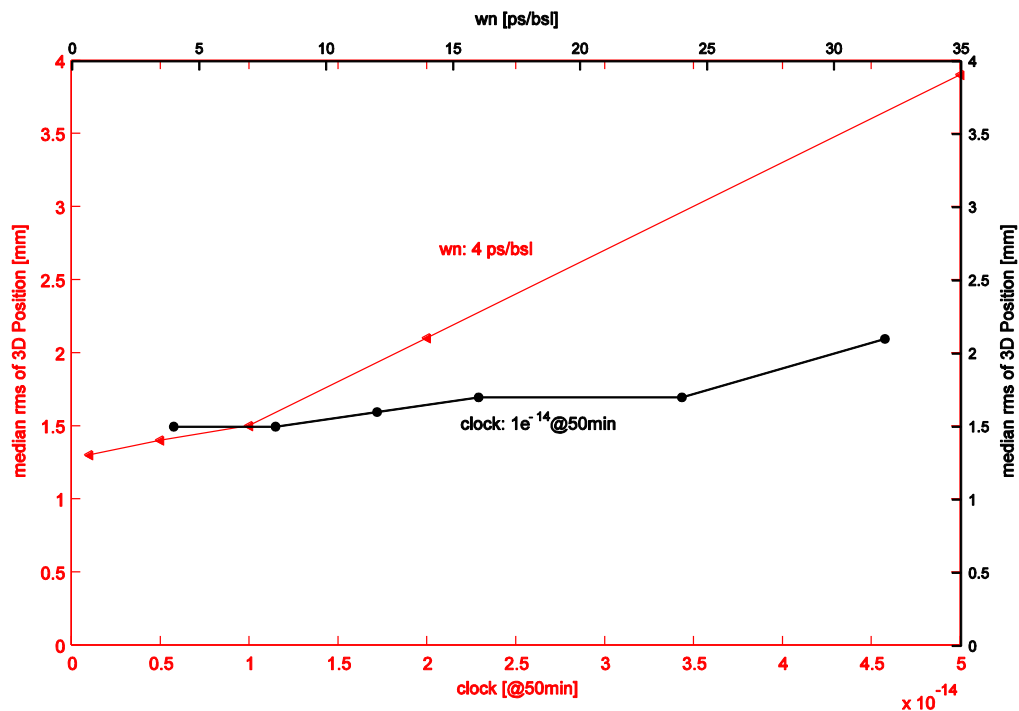


Abb. 5-47: Zusammenfassender Vergleich des Einflusses der VLBI-Stationsuhren (rot) und des Beobachtungsfehlers, weißem Rauschen (schwarz).

6 Monte-Carlo-Simulationen für VLBI2010-Spezifikationen

In Kapitel 5 sind die Erkenntnisse, die aus den verschiedenen Parametrisierungen des MCS gewonnen werden können, dokumentiert und beschrieben. Aussagen über die Genauigkeit des VLBI-Beobachtungssystems, wie der Stationsuhren und des Beobachtungsfehlers pro Basislinie, konnten basierend auf den Monte-Carlo-Simulationen getroffen werden.

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Nutzbarkeit des MCS, um die Einflüsse der Beobachtungspläne, der Antennendrehgeschwindigkeiten und der Netzwerkgrößen zu identifizieren und Aussagen über die Spezifikationen eines neuen VLBI2010-Systems treffen zu können.

6.1 Verschiedene Strategien zur Erstellung von VLBI2010-Beobachtungsplänen mit SKED

In Kapitel 5.1.1 wurde der Einfluss des Beobachtungsplans mit drei verschiedenen Beobachtungsplänen getestet, um einen Erfahrungswert zu bekommen. Bei dieser Untersuchung wurde das ZWD mit einem *random walk* simuliert.

In diesem Kapitel wird die Auswirkung verschiedener Strategien, der in SKED erzeugten Beobachtungspläne, auf die VLBI-Ergebnisse unter Verwendung des Vienna Turbulenzmodelles eruiert.

Die verschiedenen Strategien sind D0, D0I und D0In:

- D0: Der verwendete Aufzeichnungsmodus ist der *burst mode*. Dabei werden die Daten der Beobachtungen gepuffert und danach auf die Harddisk geschrieben. Als Quellenkatalog dient der klassische geodätische Radioquellenkatalog, eine Standardoptimierung wurde für den Beobachtungsplan verwendet.
- D0I: Der verwendete Aufzeichnungsmodus ist der *burst mode*. Als Quellenkatalog dient der neue Radioquellenkatalog mit 230 Radioquellen, eine Standardoptimierung für den Beobachtungsplan wurde verwendet.
- D0In: Der verwendete Aufzeichnungsmodus ist der *burst mode*. Als Quellenkatalog dient der neue Radioquellenkatalog mit 230 Radioquellen, ein neuer Optimierungsansatz wurde für den Beobachtungsplan verwendet.

Die Anzahl der Beobachtungen bei Verwendung verschieden schneller Fahrgeschwindigkeiten für die VLBI-Antennen ist in Abb. 6-1 für das Testnetzwerk mit 16 Stationen gezeigt. Für die anschließende Untersuchung mit dem MCS wurde für jede Strategie jeweils die maximale Anzahl an Beobachtungen verglichen, d.h. eine Antennendrehgeschwindigkeit von 12 °/s wurde bei der Erstellung des Beobachtungsplanes für jede VLBI-Antenne verwendet. Der Anteil der feuchten Atmosphäre wird mit dem Vienna Turbulenzmodell simuliert und der Beobachtungsfehler mit einem weißen Rauschen von 4 ps/Basislinie. Für diese Untersuchung werden die VLBI-Stationsuhren mit einer ASD von $2 \cdot 10^{-15}$ @15 min simuliert, um den Einfluss der Uhr so gering wie möglich zu halten. Dadurch wird die Auswirkung verschiedener Strategien zur Erstellung der VLBI-Beobachtungspläne verdeutlicht.

In Abb. 6-2 sind die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten für D0-, D0I- und D0In-Strategien aufgetragen. Eine Verbesserung kann schon bei der Verwendung des neuen Quellenkatalogs

(230 Radioquellen) festgestellt werden (D0 nach D0I). Eine deutliche Verbesserung bringt die Verwendung eines neuen Algorithmus zur Optimierung des Beobachtungsplanes (D0In).

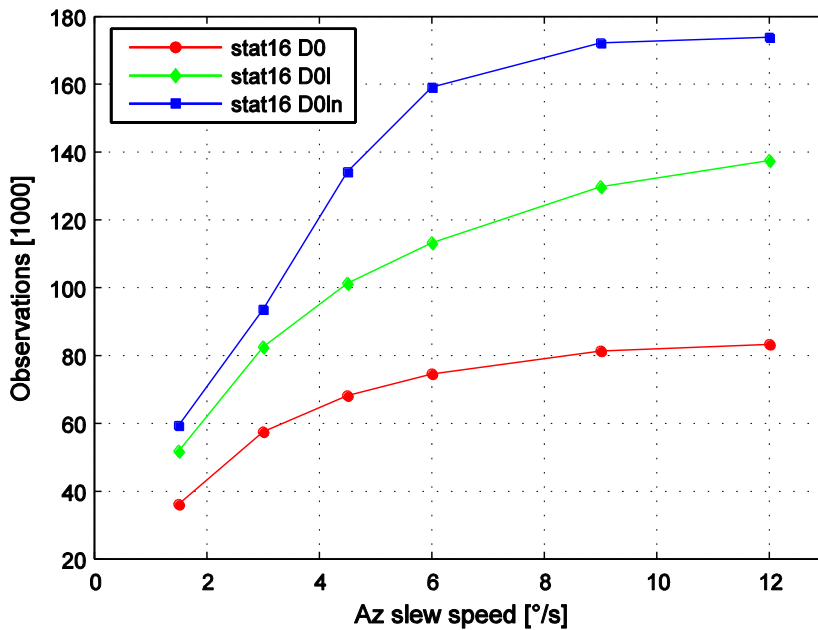


Abb. 6-1: Anzahl der Beobachtungen für die mit verschiedenen Strategien mit SKED erzeugten Beobachtungspläne für das 16 Stationen Testnetzwerk des V2C.

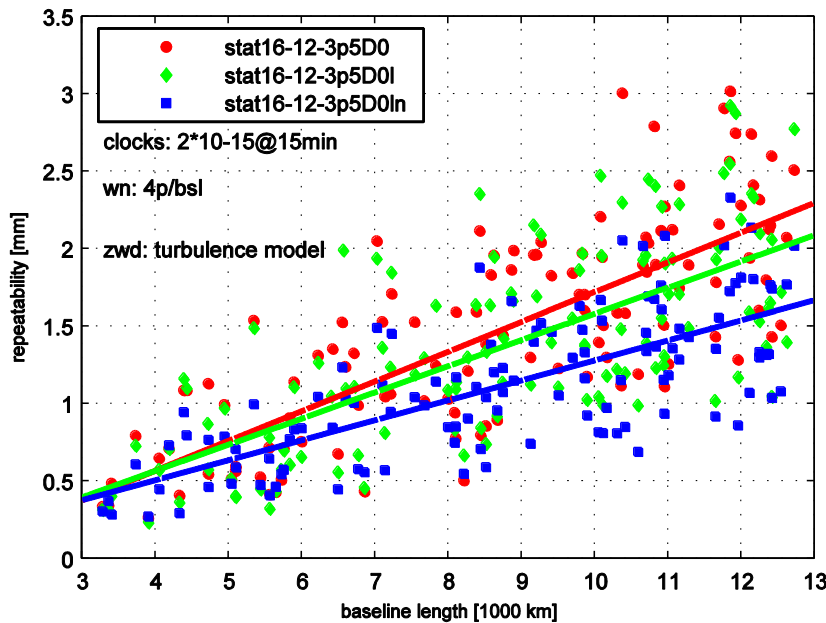


Abb. 6-2: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für die mit SKED erzeugten Beobachtungspläne D0, D0I und D0In.

In Abb. 6-3 sind die RMS-Werte für die 3D-Stationsposition abgebildet. Eine deutliche Verbesserung für den D0In-Beobachtungsplan ist erkennbar. Die Medianwerte für die 3D-Stationsposition sind D0: 1.3 mm, D0I: 1.3 mm und D0In: 1.0 mm.

Die Stationsanordnung in Abb. 6-3 lässt auch eine deutliche Nord-Süd Abhängigkeit erkennen. Dies liegt zum größten Teil daran, dass Stationen um den Äquator einen höheren Cn-Wert für die Simulation des feuchten Anteils der Atmosphäre aufweisen, was physikalisch sinnvoll ist und der Realität entspricht.

Ein weiterer Effekt liegt darin, dass südliche Stationen weniger Beobachtungen als nördliche Stationen haben (Abb. 6-4).

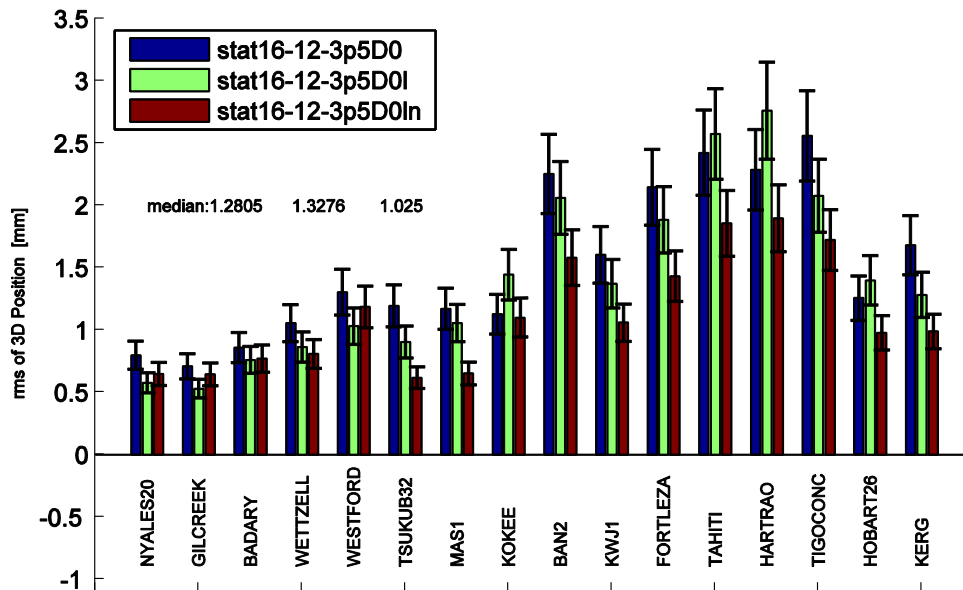


Abb. 6-3: RMS der 3D-Stationenposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für 3 verschiedene Beobachtungspläne.

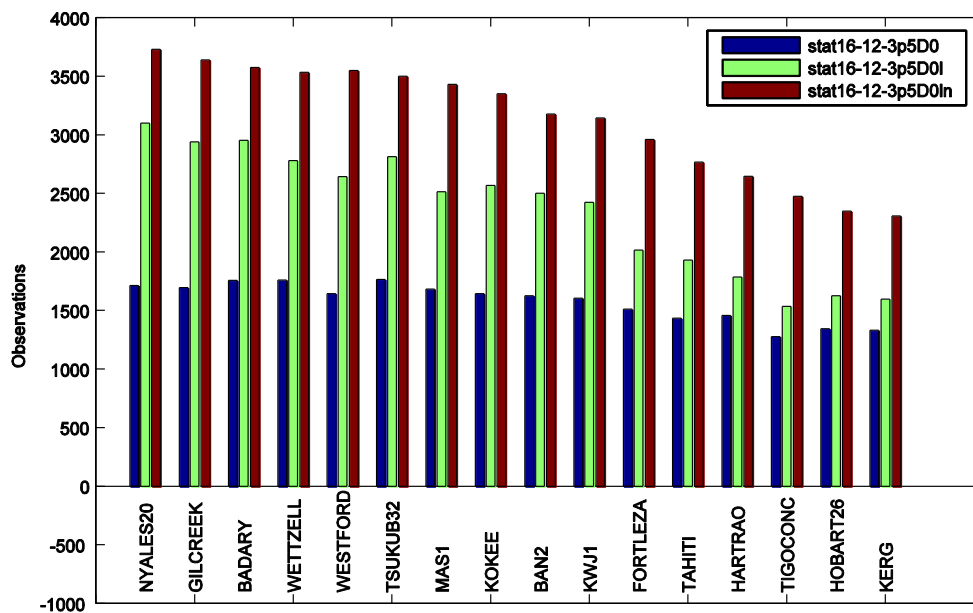


Abb. 6-4: Anzahl der Beobachtungen an den VLBI-Stationen für drei verschiedene Strategien zur Erstellung des Beobachtungsplanes mit SKED. Die Stationsreihenfolge ist von Nord nach Süd.

Der Vergleich der verschiedenen Beobachtungspläne zeigt, dass die Strategie D0In, *burst mode*, Radioquellenkatalog mit 230 Radioquellen und ein neuer Optimierungsansatz für den Beobachtungsplan, die beste Strategie zur Erzeugung von Beobachtungsplänen mit dem vom IVS verwendeten Softwarepaket SKED ist. Ein Vergleich der mit SKED erzeugten Beobachtungspläne und der *uniform sky* Beobachtungspläne ist in Kapitel 4.2 in Abb. 4-11 abgebildet und erläutert.

6.2 Ermittlung der optimalen Antennendrehgeschwindigkeiten

Eine der Hauptaufgaben, die sich das V2C gestellt hat, ist es, die Spezifikationen für das zukünftige VLBI2010-Antennensystem zu ermitteln und bekannt zu geben. Ein sehr wichtiger Faktor neben der Größe der VLBI2010-Antenne ist die optimale Antennendrehgeschwindigkeit die, basierend auf den folgenden Untersuchungen, ermittelt wird.

Die Antennendrehgeschwindigkeit, bzw. deren direkter Einfluss auf die Anzahl der Beobachtungen und weiters auf die Ergebnisse der VLBI-Auswertung, wird mit Hilfe des MCS untersucht. Vorweg muss aber gesagt sein, dass die Bauart und Größe sowie die Art des Feedhorns der VLBI-Antenne nicht Teil dieser Untersuchungen sind. Der Zusammenhang zwischen Drehgeschwindigkeit und Größe einer Antenne wird in diesen Studien nicht berücksichtigt. Um die technische Umsetzung zu garantieren, arbeiten zahlreiche Spezialisten an Feldversuchen und auch Antennenbaufirmen, wie z.B. *Patriot Antennas*, sind in diesen Prozess involviert.

Der MCS verwendet das Vienna Turbulenzmodell zur Erzeugung des feuchten Anteils der Atmosphäre, die Parameter sind in Tab. 5.5-1 angeführt, und eine ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min für die Simulation der VLBI-Stationsuhren mittels *random walk plus integrated random walk*. Als Beobachtungsfehler wird ein weißes Rauschen von 4 ps pro Basislinienbeobachtung addiert. Der Beobachtungsplan wird mit der Software SKED (Kapitel 4.2.1) erstellt. Die dabei verwendete Strategie (D0In) ist in Kapitel 6.1 beschrieben. Dabei wird für jede der 16 VLBI-Antennen des VLBI2010-Testnetzwerks die in Tab. 6.2-1 angeführte Antennendrehgeschwindigkeit verwendet.

Tab. 6.2-1: Daten der Beobachtungspläne für verschiedene Antennendrehgeschwindigkeiten.

| Antennendrehgeschwindigkeit | | durchschn. | min | max | Anz.d. | Median RMS |
|-----------------------------|----------|------------|----------|----------|---------|-------------------------|
| az [°/s] | el [°/s] | obs/h/st | obs/h/st | obs/h/st | Beob. | 3D- Stationsposition |
| 1.5 | 0.7 | 47 | 39 | 55 | 59 392 | 2.6 mm |
| 3.0 | 0.7 | 61 | 46 | 76 | 83 149 | 1.7 mm |
| 4.5 | 2.1 | 101 | 76 | 121 | 134 134 | 1.5 mm |
| 6.0 | 2.1 | 120 | 89 | 144 | 159 088 | 1.4 mm |
| 12.0 | 3.5 | 131 | 96 | 155 | 173 831 | 1.1 mm |

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit in Abb. 6-5 zeigt eine deutliche Steigerung beim Einsatz von schnelleren Antennen. Im Detail kann man sagen, dass für die Antennendrehgeschwindigkeiten von 1.5 °/s in Azimut (az) und 0.7 °/s in Elevation (el) bis 4.5 °/s in az und 2.1 °/s in el eine deutliche Verbesserung der Wiederholbarkeit zu erkennen ist. Für schnellere Antennen mit 6 °/s in az und 2.1 °/s kann keine weitere Verbesserung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit detektiert werden. Erst für eine Geschwindigkeit von 12 °/s in az und 3.5 °/s in el kann wiederum eine Präzessionssteigerung erzielt werden.

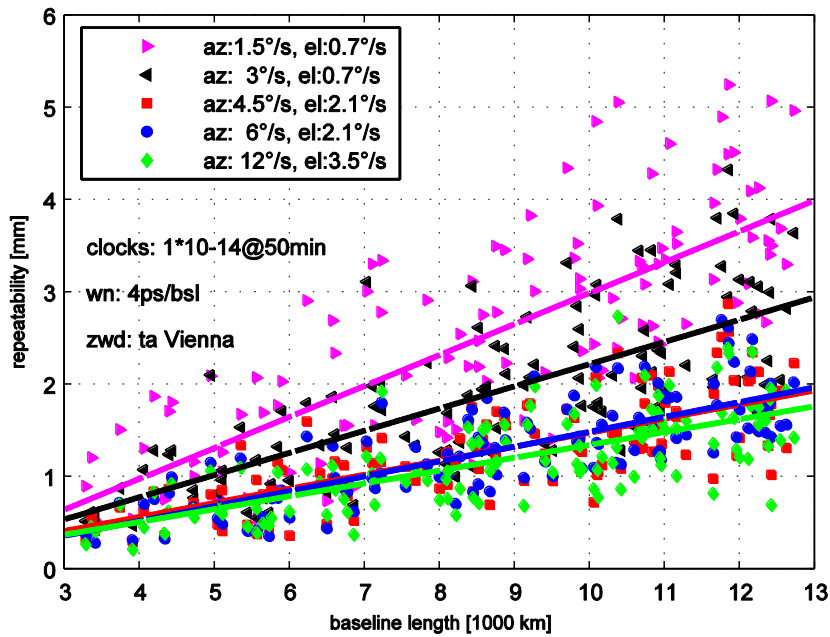


Abb. 6-5: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für Beobachtungspläne mit verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

Die RMS-Werte für die 3D-Stationspositionen und deren Vertikal- (Up), Nord- (North) und Ostkomponenten (East) sind in Abb. 6-6 bis Abb. 6-9 abgebildet. Eine Verbesserung der RMS-Werte für schnellere Antennen bis zu einer Geschwindigkeit von 4.5 °/s in az und 2.1 °/s in el ist erkennbar. Für schnellere Antennen liefert der Median der RMS-Werte (1.1 mm) der Stationsposition eine deutliche Verbesserung für Antennen mit einer Geschwindigkeit von 12 °/s in az und 3.5 °/s in el (Tab. 6.2-1).

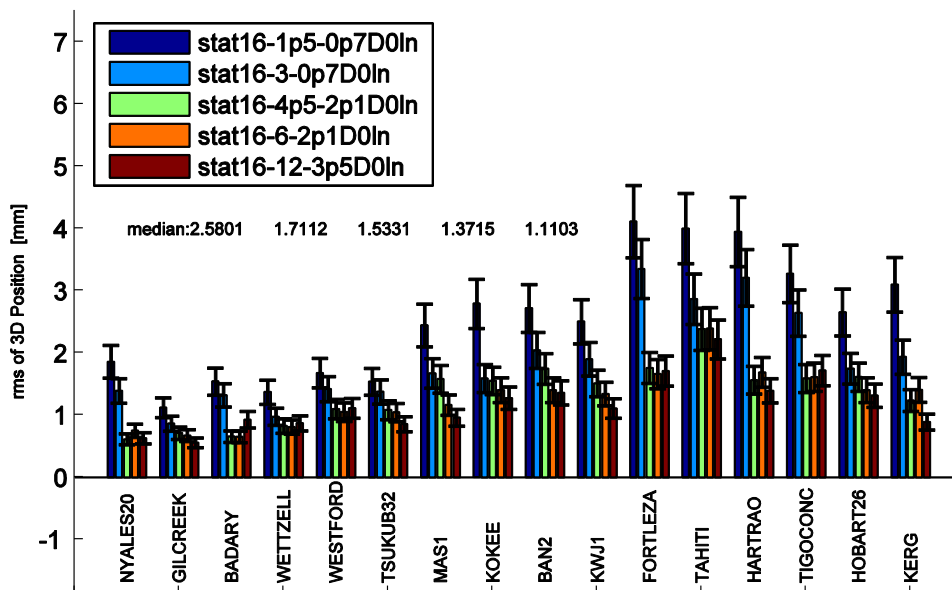


Abb. 6-6: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für verschiedene Antennendrehgeschwindigkeiten.

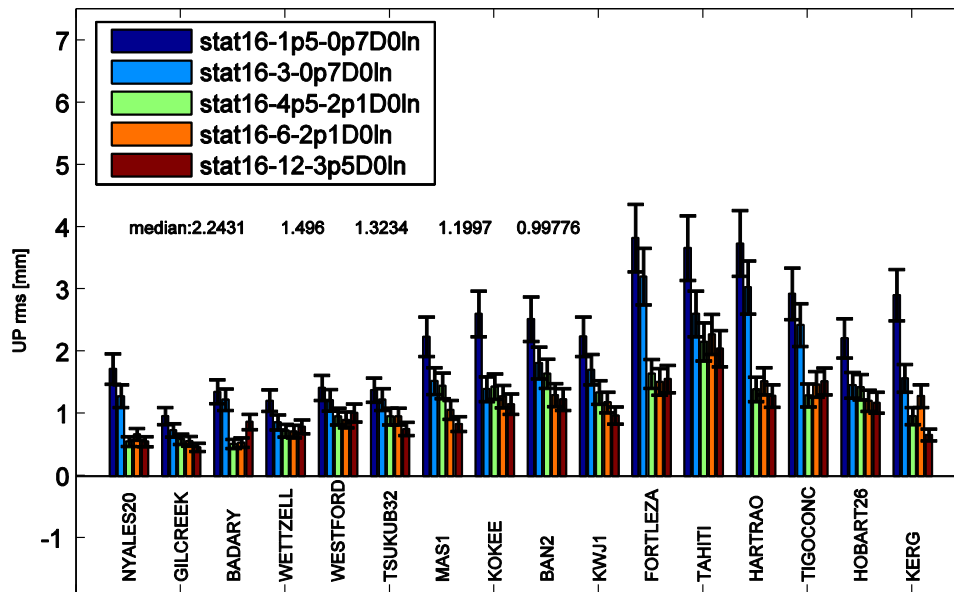


Abb. 6-7: RMS der Vertikalkomponente (U_p) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für verschiedene Antennendrehgeschwindigkeiten.

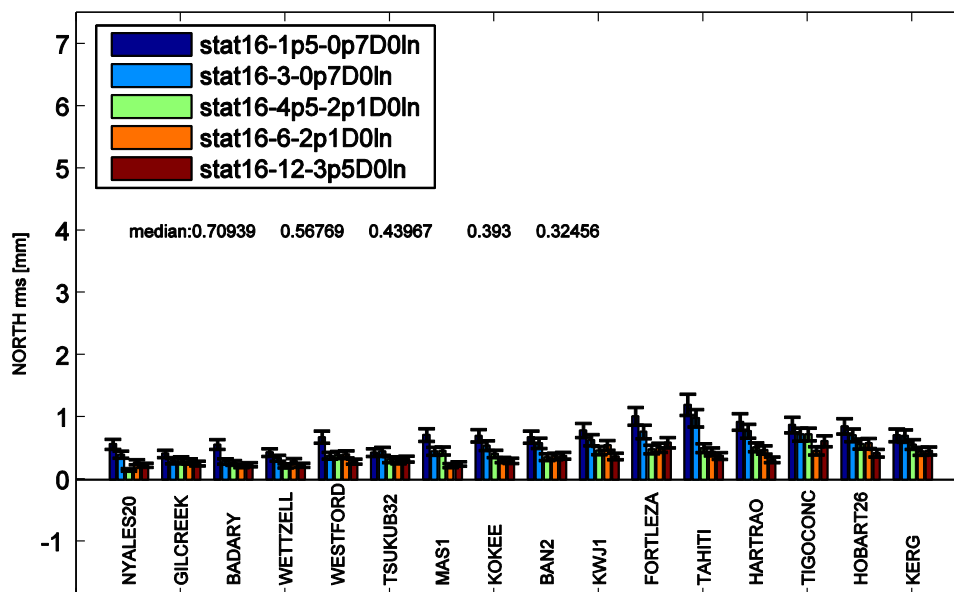


Abb. 6-8: RMS der Nordkomponente ($North$) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für verschiedene Antennendrehgeschwindigkeiten.

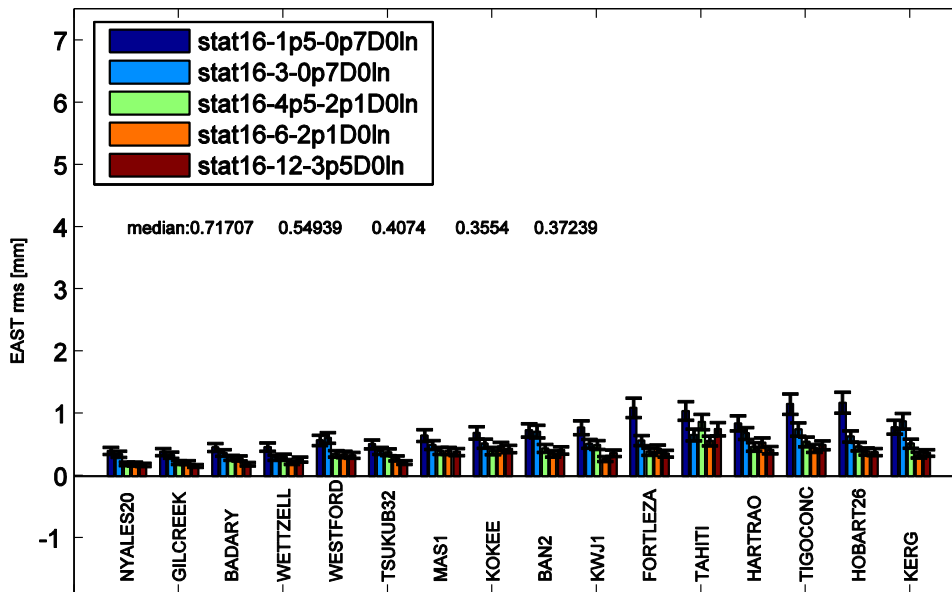


Abb. 6-9: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für verschiedene Antennendrehgeschwindigkeiten.

Um nicht nur die 3D-Stationskoordinaten und Basislinienlängen als Beurteilungskriterien zur Verfügung zu haben, ist in Abb. 6-10 der Maßstabsfaktor der 7 Parameter Helmert-Transformation (Gleichung (4.4-9)) angegeben. Der Maßstabsfaktor, der dimensionslos ist, wird mit dem Erdradius multipliziert um eine dimensionsabhängige Größe (mm) zu erhalten und eine bessere Abschätzung der Qualität zu erzielen. Auch hier kann man sehen, dass für die Drehgeschwindigkeiten von 1.5 °/s in az und 0.7 °/s in el bis zu 4.5 °/s in az und 2.1 °/s in el eine deutliche Genauigkeitssteigerung zu erzielen ist.

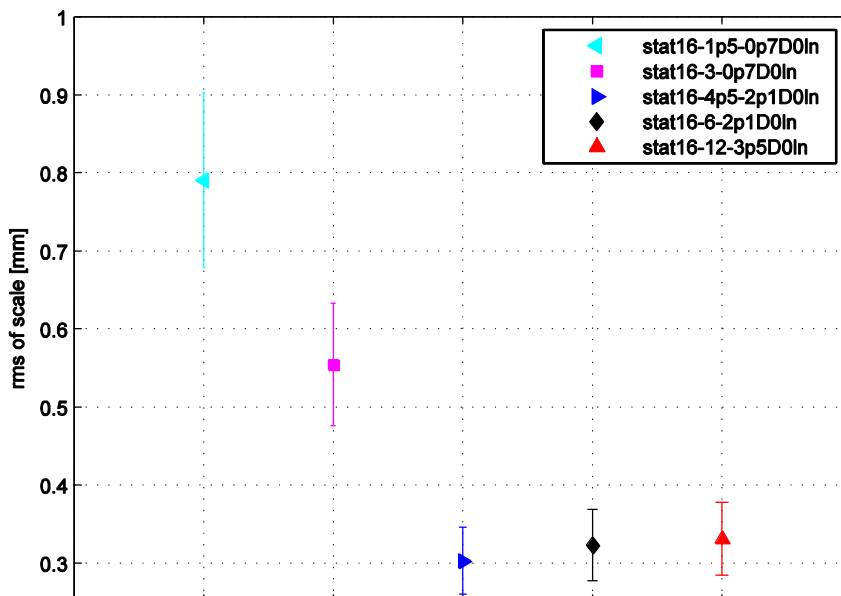


Abb. 6-10: RMS des Maßstabsfaktors (*scale*) der 7 Parameter Helmert-Transformation.

In Kapitel 4.2 wurden die verschiedenen Möglichkeiten zur Erstellung von VLBI-Beobachtungsplänen diskutiert. Abb. 4-11 vergleicht einen *sky plot* für einen mit dem Softwarepaket SKED und einem mit dem *uniform sky* Algorithmus erstellten Beobachtungsplan. Kapitel 6.1 hingegen untersucht die Auswirkungen der verschiedenen Strategien, die in SKED zu einer Steigerung der Beobachtungsdichte führen.

Die im folgenden Abschnitt betrachteten *uniform sky* Beobachtungspläne haben ein festes Beobachtungsintervall für alle Beobachtungen über den gesamten Beobachtungszeitraum von 24 Stunden. Die Beobachtungspläne werden ohne Berücksichtigung der Antennendrehgeschwindigkeit erstellt. Es ist aber möglich, die notwendige Antennendrehgeschwindigkeit zur Realisierung der verschiedenen *uniform sky* Beobachtungspläne zu ermitteln (Tab. 6.2-2). Dadurch kann auch die optimale Drehgeschwindigkeit mit den *uniform sky* Beobachtungsplänen bestimmt und mit den D0In Beobachtungsplänen verglichen werden.

Tab. 6.2-2: Anzahl der Beobachtungen und erforderliche Antennendrehgeschwindigkeiten in Azimut und Elevation für *uniform sky* Beobachtungspläne.

| Station | Beobachtungsintervall [s] | <i>uniform sky</i> [min] | Drehgeschwindigkeit | | Beschleunigung | Nr. d. Beob. | Median 3D RMS [mm] |
|---------|---------------------------|--------------------------|---------------------|----------|---------------------|--------------|--------------------|
| | | | az [°/s] | el [°/s] | [°/s ²] | | |
| 16 | 15 | 3 | 32.0 | 8.0 | 8.0 | 278 830 | 0.9 |
| 16 | 30 | 6 | 12.0 | 3.2 | 3.0 | 139 564 | 1.0 |
| 16 | 45 | 9 | 7.3 | 1.8 | 1.3 | 93 231 | 1.3 |
| 16 | 60 | 12 | 4.8 | 1.1 | 1.3 | 69 708 | 1.5 |
| 16 | 90 | 12 | 3.2 | 0.8 | 1.3 | 46 244 | 2.0 |
| 16 | 120 | 12 | 2.1 | 0.6 | 1.3 | 34 806 | 3.2 |
| 16 | 240 | 24 | 1.0 | 0.3 | 1.3 | 17 561 | 6.2 |
| 16 | 360 | 36 | 0.7 | 0.2 | 1.3 | 11 412 | 11.0 |

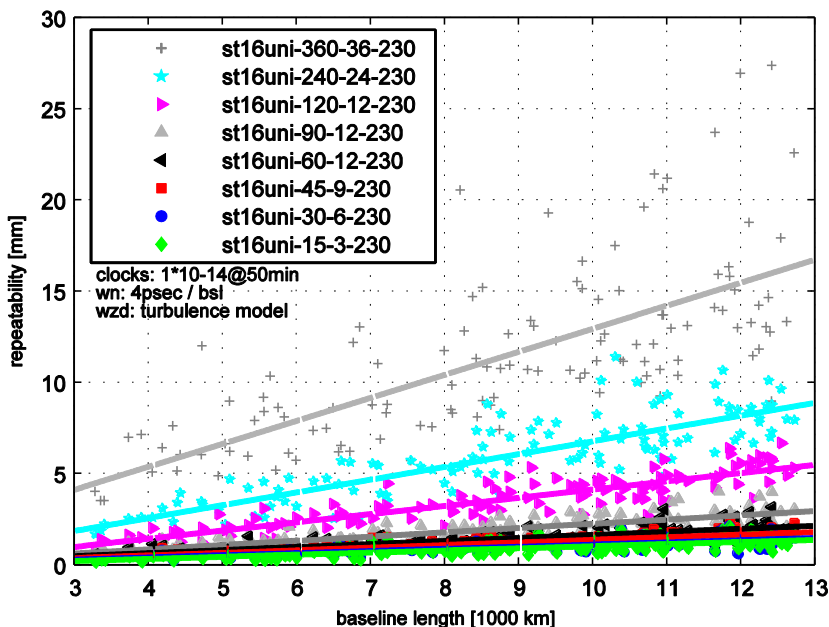


Abb. 6-11: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für *uniform sky* Beobachtungspläne mit acht verschiedenen Beobachtungsintervallen und daraus folgend acht verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit für die *uniform sky* Beobachtungspläne sind in Abb. 6-11 dargestellt. Für den Beobachtungsplan mit 360 s Beobachtungsintervall (0.7 °/s az und

0.2 °/s el) und 11 412 Beobachtungen erhält man eine ähnliche Performance wie die für CONT05 mit 6 550 Beobachtungen in 24 Stunden erzielte. Der Beobachtungsplan mit 240 s Beobachtungsintervall (1.0 °/s az und 0.3 °/s el) und 17 561 Beobachtungen ist von den Ergebnissen her auch weit über den von VLBI2010 gesteckten Zielen. Um einen detaillierteren Aufschluss der Beobachtungspläne von 120 s bis 15 s Beobachtungsintervall zu bekommen sind diese in Abb. 6-12 mit Ordinatenwerten < 7mm abgebildet. Für diese Beobachtungspläne gilt, dass eine sehr deutliche Genauigkeitssteigerung bis zu 60 s Beobachtungsintervall zu erkennen ist, von 60 (4.8 °/s az und 1.1 °/s el) auf 15 s (32 °/s az und 8 °/s el) kann eine Genauigkeitssteigerung von ~ 1mm erzielt werden. Das zeigen auch die Darstellungen der 3D-Stationspositionen und ihrer Vertikal- (*Up*), Nord- (*North*) und Ostkomponenten (*East*) in Abb. 6-13 bis Abb. 6-17.

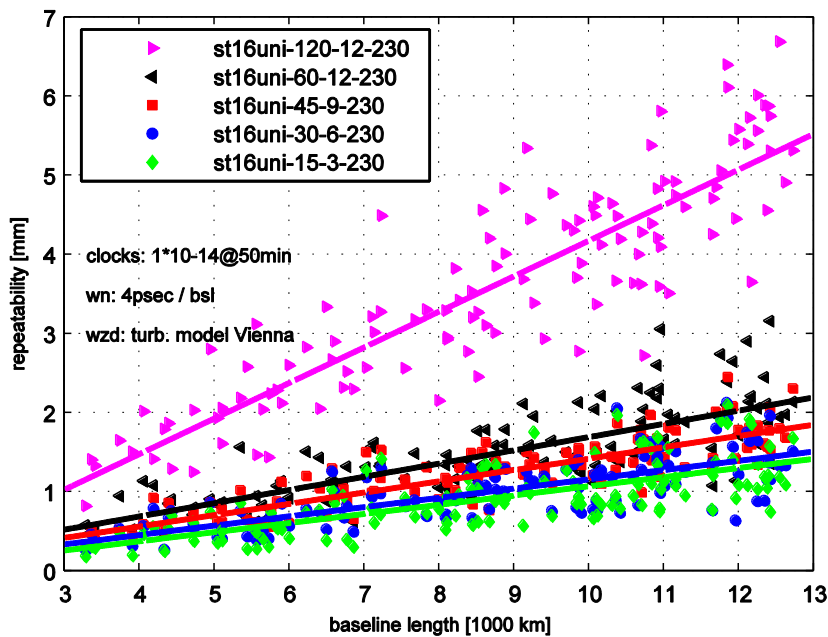


Abb. 6-12: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für *uniform sky* Beobachtungspläne mit fünf verschiedenen Beobachtungsintervallen (120 s – 15 s) und daraus folgend fünf verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

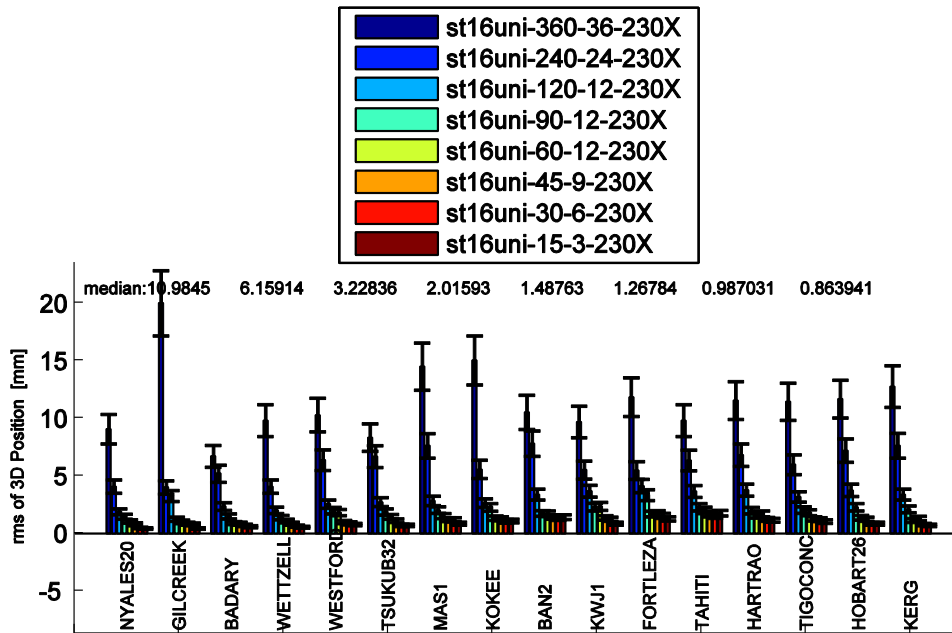


Abb. 6-13: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für *uniform sky* Beobachtungspläne mit acht verschiedenen Beobachtungsintervallen (360 s – 15 s) und daraus folgend acht verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

Um die Eigenschaften der *uniform sky* Beobachtungspläne mit einem Beobachtungsintervall von ≤ 120 s besser beurteilen zu können sind wie schon in der Abbildung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten nur die für VLBI2010 relevanten Intervalle von 120 s – 15 s in Abb. 6-14 bis Abb. 6-17 dargestellt.

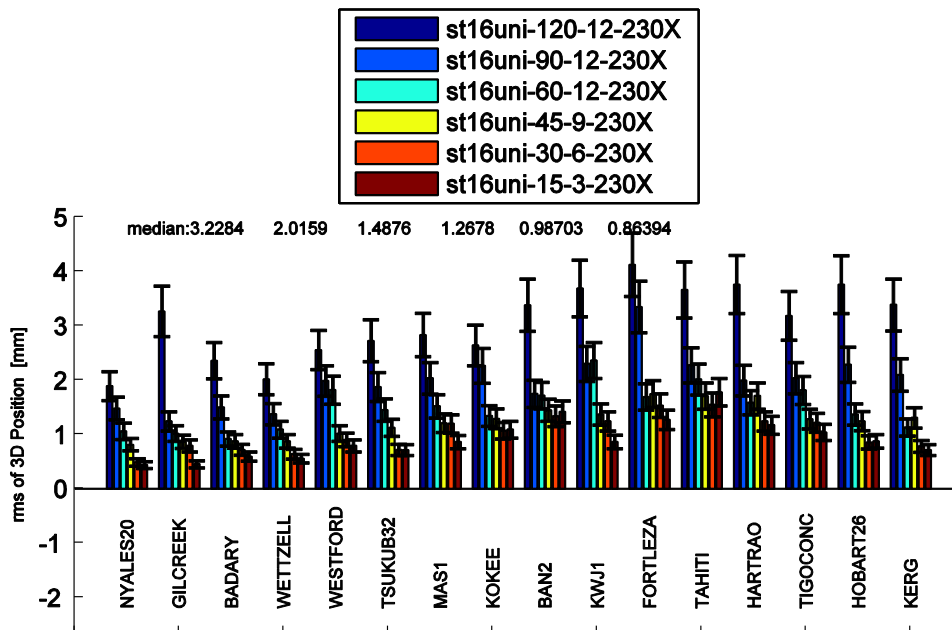


Abb. 6-14: RMS der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für *uniform sky* Beobachtungspläne mit fünf verschiedenen Beobachtungsintervallen (120 s – 15 s) und daraus folgend fünf verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

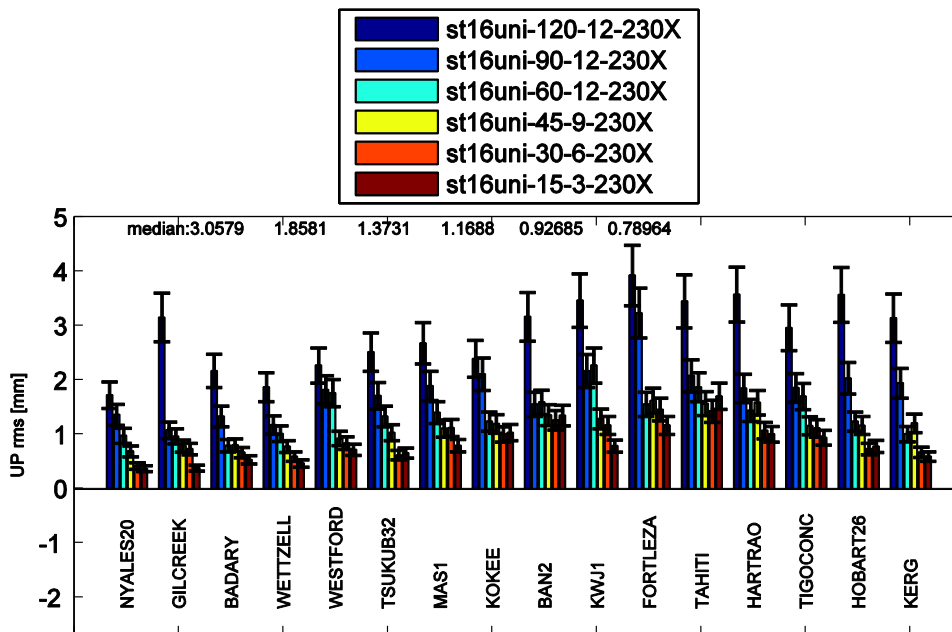


Abb. 6-15: RMS der Vertikalkomponente (*Up*) der 3D-Stationenposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für *uniform sky* Beobachtungspläne mit fünf verschiedenen Beobachtungsintervallen (120 s – 15 s) und daraus folgend fünf verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

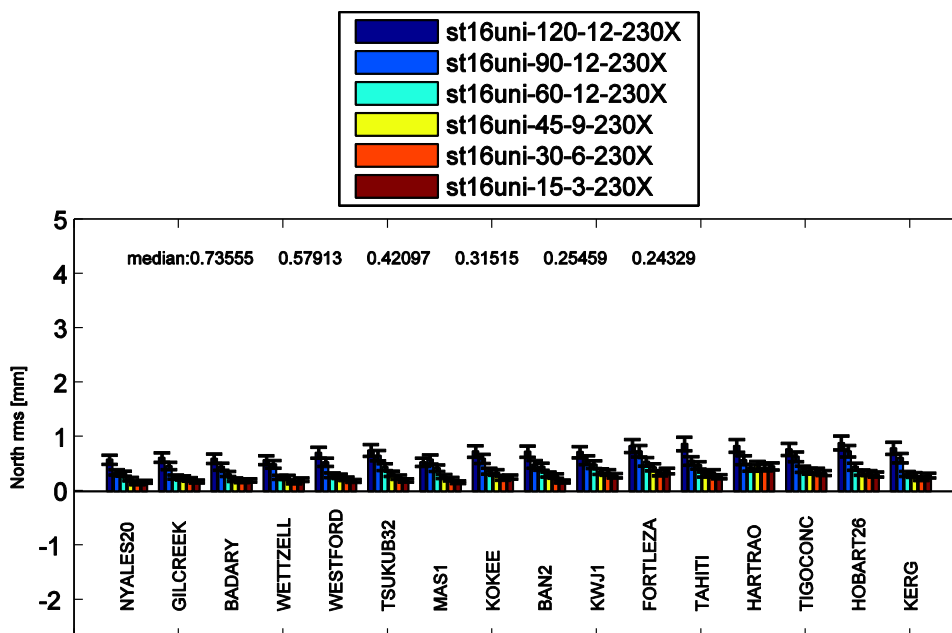


Abb. 6-16: RMS der Nordkomponente (*North*) der 3D-Stationenposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für *uniform sky* Beobachtungspläne mit fünf verschiedenen Beobachtungsintervallen (120 s – 15 s) und daraus folgend fünf verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

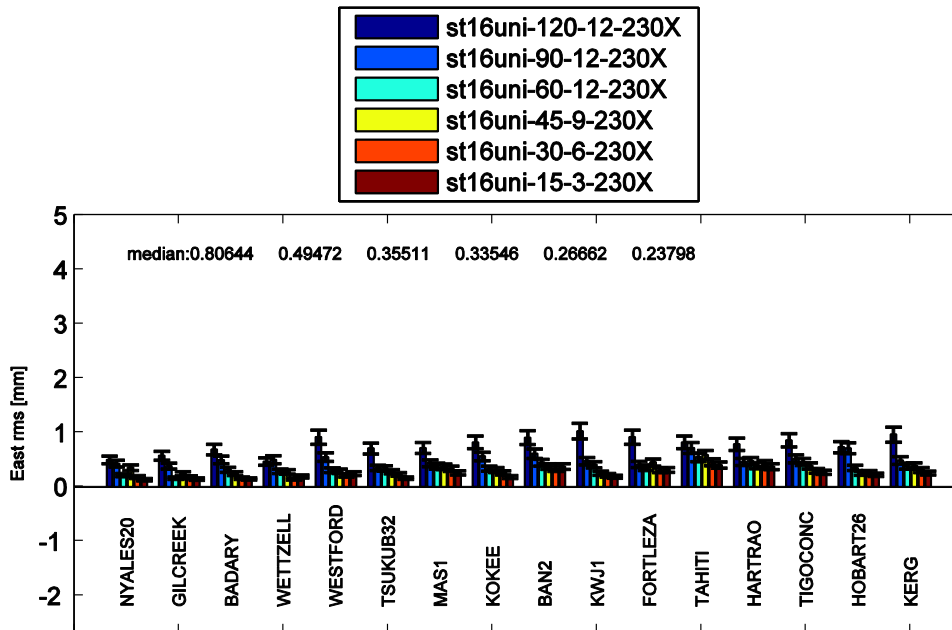


Abb. 6-17: RMS der Ostkomponente (*East*) der 3D-Stationsposition in der Stationsreihenfolge von Nord nach Süd für *uniform sky* Beobachtungspläne mit fünf verschiedenen Beobachtungsintervallen (120 s – 15 s) und daraus folgend fünf verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten.

In Abb. 6-18 ist der Maßstabsfaktor der 7 Parameter Helmert-Transformation abgebildet. Der Maßstabsfaktor, der dimensionslos ist, wird mit dem Erdradius multipliziert um eine dimensionsabhängige Größe (mm) zu erhalten und eine bessere Abschätzung der Qualität zu erzielen. In Abb. 6-19 sind die RMS-Werte für den Maßstabsfaktor für die mit Sked erzeugten, D0In-Beobachtungspläne und die *uniform sky* Beobachtungspläne gemeinsam dargestellt. Es wird deutlich, dass die *uniform sky* Beobachtungspläne mit gleicher Anzahl von Beobachtungen eine bessere Performance liefern.

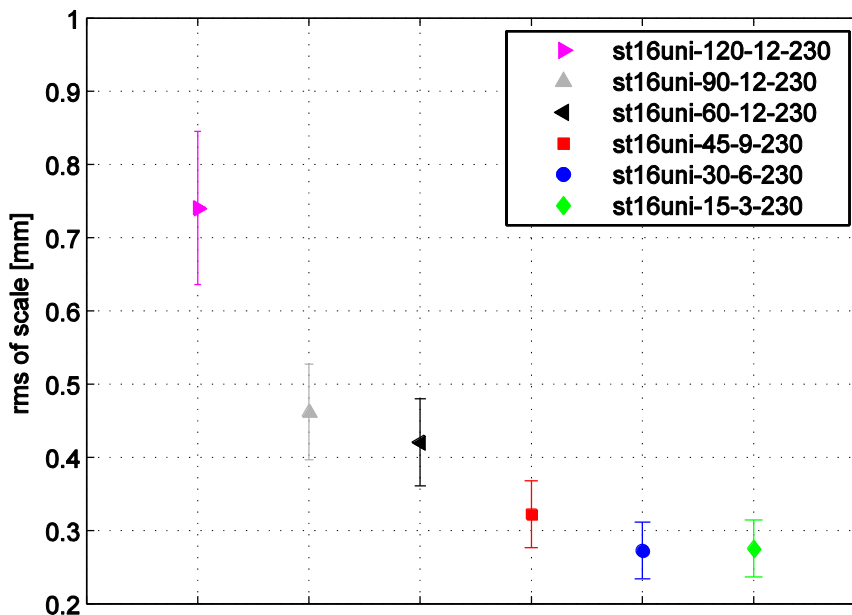


Abb. 6-18: RMS des Maßstabsfaktors (*scale*) der 7 Parameter Helmert-Transformation für verschiedene *uniform sky* Beobachtungspläne.

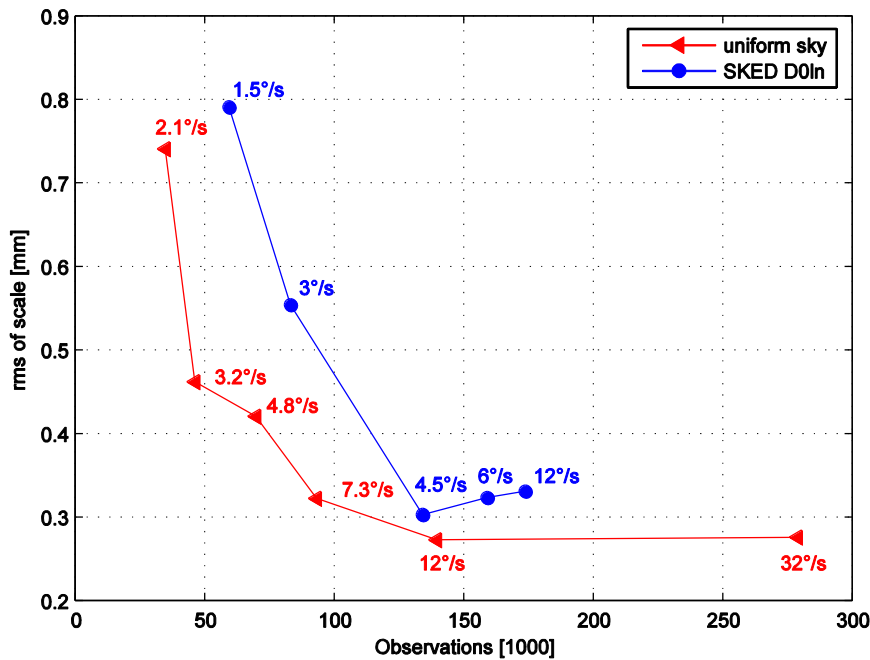


Abb. 6-19: RMS des Maßstabfaktors (*scale*) der 7 Parameter Helmert-Transformation für D0In-Beobachtungspläne mit verschiedenen Antennendrehgeschwindigkeiten (blau) und *uniform sky* Beobachtungsplänen (rot) in Abhängigkeit der Anzahl der Beobachtungen des 24h VLBI-Experiments.

Vergleicht man die zwei verschiedenen Arten von Beobachtungsplänen, kann man folgende Aussagen treffen:

- *Uniform sky* Beobachtungspläne benötigen deutlich schnellere Antennen wie D0In-Beobachtungspläne, um zur gleichen Anzahl an Beobachtungen zu kommen.
- Das RMS des Maßstabfaktors (*scale*) ist für *uniform sky* Beobachtungspläne kleiner als für D0In-Beobachtungspläne mit gleicher Anzahl an Beobachtungen.
- Vergleicht man die Mediane des RMS der 3D-Stationsposition in Abhängigkeit der Antennengeschwindigkeit, so liefern beide Algorithmen (*uniform sky* und D0In) annähernd die gleichen Resultate ab einer Drehgeschwindigkeit von ~ 4 °/s (Abb. 6-20).
- Vergleicht man die Mediane des RMS der 3D-Stationsposition in Abhängigkeit der Anzahl der Beobachtungen, ist der *uniform sky* Beobachtungsplan mit < 170 000 Beobachtungen deutlich besser als D0In (Abb. 6-21).

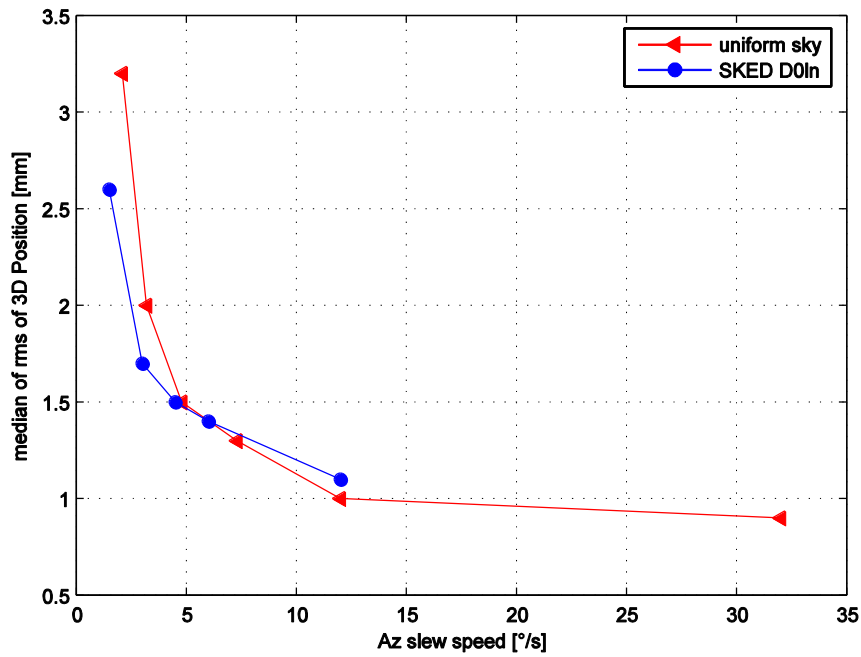


Abb. 6-20: Medianwerte des RMS der 3D-Stationsposition in Abhängigkeit von der azimuthalen Antennendrehgeschwindigkeit für *uniform sky* (rot) und D0In-Beobachtungspläne (blau).

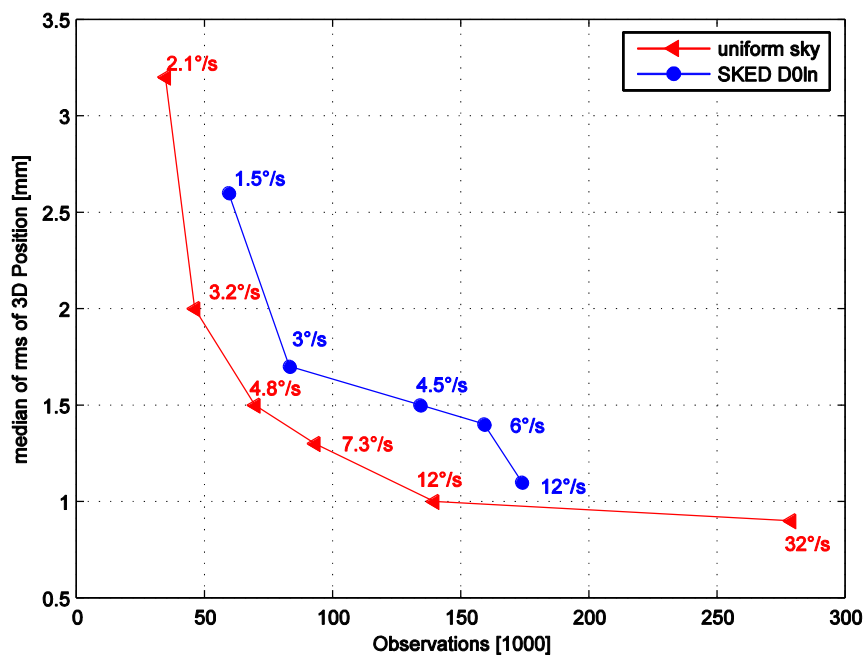


Abb. 6-21: Medianwerte des RMS der 3D-Stationsposition in Abhängigkeit von der Anzahl der Beobachtungen für *uniform sky* (rot) und D0In-Beobachtungspläne (blau). Die azimuthalen Antennendrehgeschwindigkeiten sind als numerische Werte in der Abbildung enthalten.

6.3 VLBI2010-Testnetzwerke

Das V2C hat für die Simulationen vier verschiedene Testnetzwerke entworfen (Abb. 6-22). Die Netzwerke beinhalten 16, 24, 32 und 40 Stationen, wobei das Netzwerk mit 40 Stationen für die folgenden Simulationen nicht verwendet wird (blass dargestellt). Die Netzwerke bestehen aus vorhandenen und geplanten, sowie aus fiktiven VLBI-Stationen. Für die Auswahl der geographischen Lage der fiktiven VLBI-Stationen wurden die Positionen der IGS-Stationen (*International GPS Network*) gewählt. Das Ziel ist es, ein Netzwerk mit möglichst gleichmäßiger globaler Stationsverteilung zu erstellen.

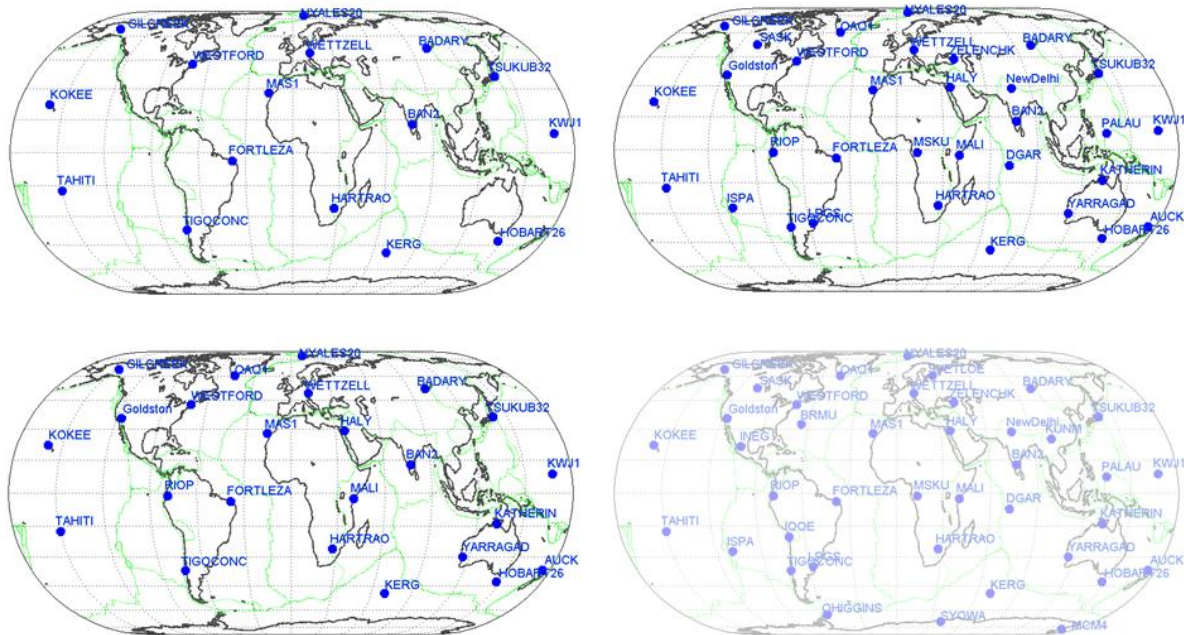


Abb. 6-22: V2C Testnetzwerke mit 16, 24, 32 und 40 VLBI-Stationen.

Eine Monte-Carlo-Simulation mit 3 verschiedenen Netzwerken mit 16, 24 und 32 Stationen wird durchgeführt. Zur Erstellung des Beobachtungsplanes wird der *uniform sky* Algorithmus mit einer Beobachtungsdauer von 45 s pro Scan verwendet. Die Drehgeschwindigkeit aller VLBI-Antennen beträgt $7.3 \text{ }^\circ/\text{s}$ in az und $1.8 \text{ }^\circ/\text{s}$ in el. Die Anzahl der Beobachtungen ist 93 231 für 16 Stationen, 216 322 für 24 Stationen und 393 686 für das Netzwerk mit 32 Stationen.

Die Parameter für den MCS sind für die 3 Analysen der 3 Netzwerke gleich:

- Uhren mit einer ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @ 50 min,
- weißes Rauschen von 4 ps und
- Simulation des ZWD mit dem Vienna Turbulenzmodell. Die Parameter C_n , H und die Windgeschwindigkeit in Nord und Ostrichtung sind für alle 40 Stationen in Anhang A angeführt.

Die Auswertung der simulierten Daten ergibt keinen signifikanten Unterschied der verschiedenen Netzwerke in Hinblick auf Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (Abb. 6-23). Dies liegt daran, dass der Großteil der hinzugefügten Stationen in der Nähe des Äquators oder küstennah positioniert sind. Dies führt dazu, dass Stationen mit einem hohen C_n -Wert für das Turbulenzmodell hinzugefügt werden, was wiederum zu keiner Verbesserung der VLBI-

Ergebnisse führen kann. Bei der Stationsauswahl sollte die Atmosphäre und ihre Variation berücksichtigt werden, um von einer zusätzlichen VLBI-Station profitieren zu können.

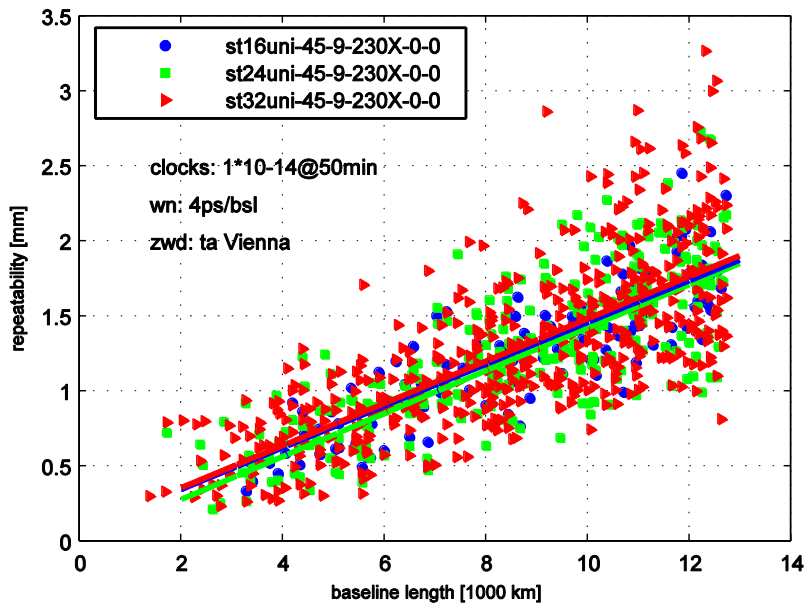


Abb. 6-23: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für die 3 V2C-Testnetzwerke mit 16 (blau), 24 (grün) und 32 (rot) VLBI-Stationen. Zur Erstellung des Beobachtungsplanes wurde der *uniform sky* Algorithmus mit einer Beobachtungsdauer von 45 s verwendet.

Um den Einfluss der verschiedenen Netzwerke unabhängig von den Parametern des Turbulenzmodells untersuchen zu können wird ein konstantes Turbulenzmodell für alle 32 Stationen verwendet. Die Parameter dafür sind die nominalen Werte des Turbulenzmodells aus Treuhaft und Lanyi (1987).

- $C_n = 2.4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1/3}$
- $H = 1000 \text{ m}$
- Wind = 8 m/s in Richtung Osten

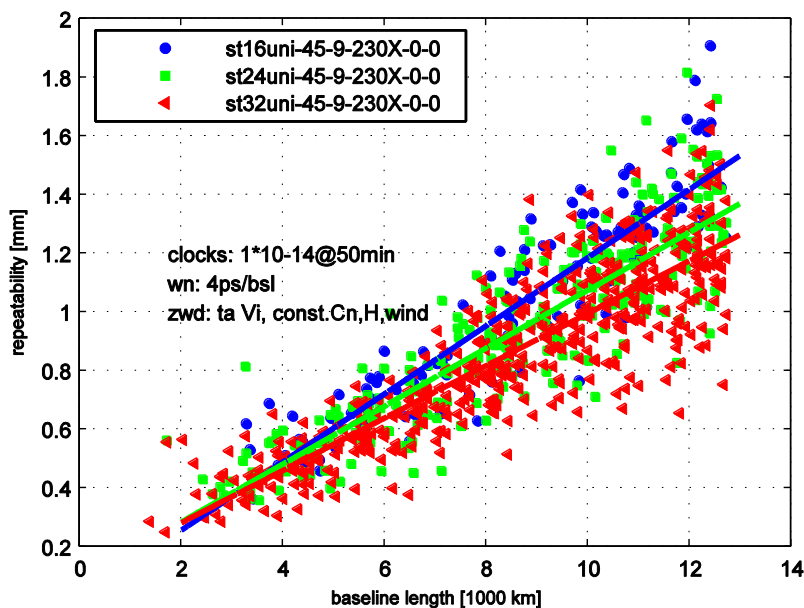


Abb. 6-24: Basislinienlängen-Wiederholbarkeit (*repeatability*) für die 3 V2C-Testnetzwerke mit 16 (blau), 24 (grün) und 32 (rot) VLBI-Stationen. Zur Erstellung des Beobachtungsplanes wurde der *uniform sky* Algorithmus mit einer Beobachtungsdauer von 45 s verwendet. Der MCS verwendete ein stationsunabhängiges Turbulenzmodell mit konstanten Werten für C_n , H und der Windgeschwindigkeit.

Die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten (Abb. 6-24) zeigen jetzt eine Verbesserung für das dichtere Netzwerk. Die Medianwerte der RMS der 3D-Stationenposition zeigen keine signifikante Änderung für das Netzwerk mit 16 Stationen: 1.08 mm, für 24: 0.98 mm und für 32 VLBI-Antennen: 0.97 mm. Betrachtet man aber die RMS-Werte für den Maßstabsfaktor der 7 Parameter Helmert-Transformation (Abb. 6-25), so kann man eine deutliche Genauigkeitssteigerung für größere Netzwerke erkennen.

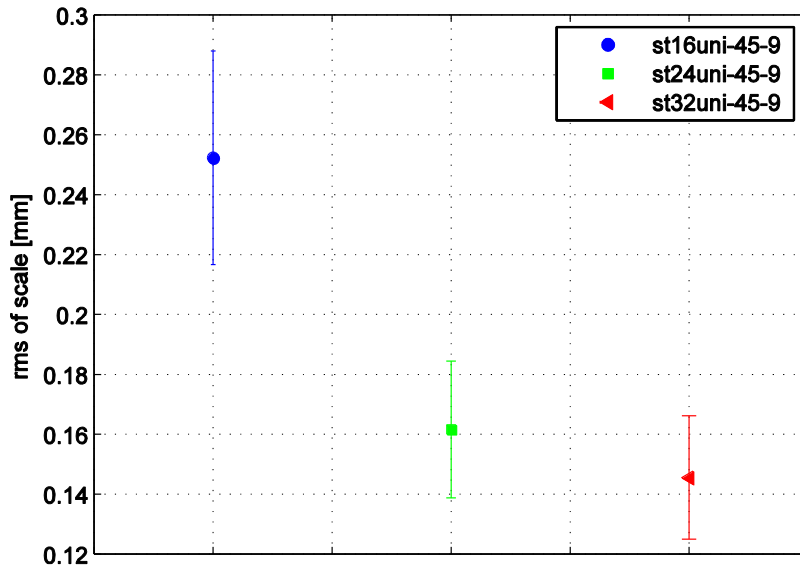


Abb. 6-25: RMS-Werte des Maßstabsfaktors (*scale*) der 7 Parameter Helmert-Transformation.

Einen weiteren Aufschluss über die Steigerung der Performance verschiedener Netzwerke geben die RMS-Werte für die Erdorientierungsparameter (EOP) x-Pol, y-Pol und dUT. Der Satz der EOPs wird für ein 24-Stunden VLBI-Experiment einmal geschätzt. Nach der Monte-Carlo-Simulation kann man die RMS-Werte für die 25 EOPs bestimmen. Vergleicht man die RMS-Werte für verschiedene Netzwerke (Abb. 6-26), erkennt man, dass dUT am stärksten von größeren Netzwerken profitiert.

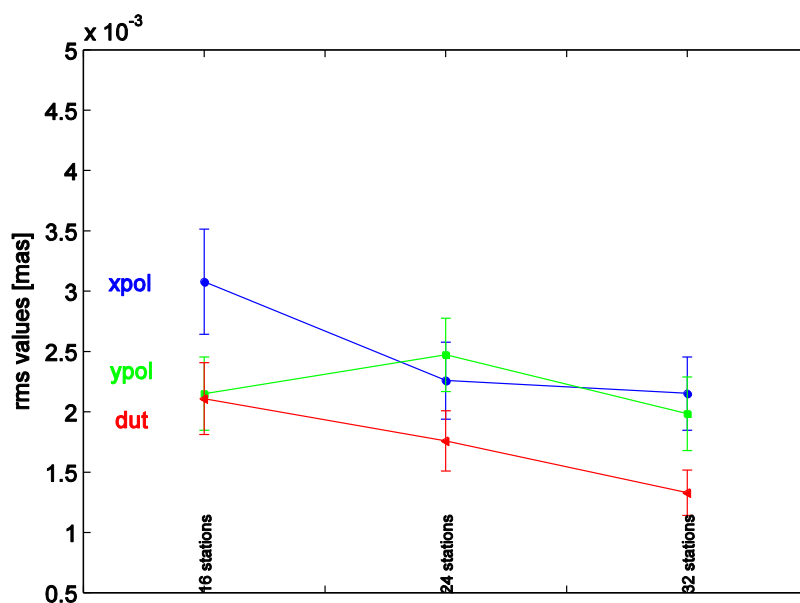


Abb. 6-26: Rms der EOP für verschiedene Netzwerke mit 16, 24 und 32 VLBI-Antennen.

7 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit dem Monte-Carlo-Simulator (MCS) ist es möglich, synthetische VLBI-Beobachtungen zu erzeugen. Der dafür entwickelte MCS basiert auf Modellen für die feuchte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung (*zenith wet delay*, ZWD), der VLBI-Stationsuhren und dem modellierten Beobachtungsfehler. Damit wird der verkürzte Beobachtungsvektor $o-c$ simuliert. Die VLBI-Stationsuhren werden durch einen *random walk plus integrated random walk* dargestellt (Herring et al., 1990). Die verwendete ASD für VLBI2010-Stationsuhren ist $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min. Der Beobachtungsfehler wird mit einem weißen Rauschen modelliert, das eine Standardabweichung von 4 ps aufweist. Das ZWD kann für erste Abschätzungen mit einem *random walk* (Herring et al., 1990) oder für genauere Untersuchungen mit einem Turbulenzmodell (Onsala und Vienna) (Nilsson et al., 2007) simuliert werden.

Aufgrund der sehr hohen Anzahl der Beobachtungen eines VLBI2010-Beobachtungsplanes (bis zu 180 000 Beobachtungen für ein Netzwerk mit 16 VLBI-Stationen) wird das Kalman Filter der VLBI-Analyse Software OCCAM 6.2 SIM verwendet. Die Schätzung des ZWD mit Schätzung von Nord- und Ostgradienten zur Beschreibung azimuthaler Asymmetrien des feuchten Anteils der Atmosphäre bringt eine deutliche Genauigkeitssteigerung mit sich, weshalb für weitere Untersuchungen einer *variance rate* von $0.7 \text{ ps}^2/\text{s}$ für das ZWD und eine *variance rate* von $0.5 \text{ ps}^2/\text{s}$ für die Schätzung der Gradienten für die VLBI-Analyse verwendet werden. Diese Parameter sind aber sehr eng mit der Anzahl der Beobachtungen, bzw. der Beobachtungsdichte korreliert, weshalb diese Werte für Beobachtungspläne mit geringer Beobachtungsdichte nicht den gewünschten Erfolg bringen.

Erste Untersuchungen mit dem *random walk* Modell zur Simulation des ZWD zeigen, dass der größte Einfluss auf die VLBI-Analyse, im speziellen auf die Basislinienlängen-Wiederholbarkeit, durch den Anteil des ZWD gegeben ist. Folglich ist es von großer Bedeutung, sehr gute Modelle zur Modellierung der feuchten Atmosphäre zu Verfügung zu haben. Das Onsala (Nilsson et al., 2007) und das darauf basierende Vienna Turbulenzmodell sind stationsabhängige Turbulenzmodelle, die im Vergleich mit den beobachteten Daten der kontinuierlichen VLBI-Kampagne CONT05 eine mittlere Differenz von 1.2 mm (Onsala) und -0.6 mm (Vienna) der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit aufweisen. Die Parameter Cn, H, und Windgeschwindigkeit steuern dabei das Turbulenzmodell. Der Einfluss der verschiedenen Größen der Parameter und ihre Wechselwirkung auf die VLBI-Ergebnisse zeigen, dass die Wahl der Cn-Werte und der Höhe H größere Auswirkungen als die Windgeschwindigkeit haben.

Die Größe der Standardabweichung des weißen Rauschens kann mit $< 8 \text{ ps}$ und einen dadurch erzielten Medianwert für das RMS der 3D-Stationenposition von 1.5 mm als ausreichend genau angenommen werden. In dieser Simulation wird durch das weiße Rauschen der gesamte Beobachtungsfehler wie z.B. *cable cal*, *thermal deformation* usw. modelliert, weshalb die Schlussfolgerung, dass eine Standardabweichung von 8 ps für die Empfangseinrichtung (Feedhorn) ausreicht, nicht getroffen werden kann.

Die Modelle der VLBI-Stationsuhren zeigen, dass ein ASD von $< 1 \cdot 10^{-14}$ @50 min keine wesentlichen Verbesserungen für die VLBI-Parameter darstellt. Auch hier muss angemerkt werden, dass mit $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min der Anteil der VLBI-Stationsuhr und nicht die einzelne Performance des Wasserstoff-Masers simuliert wurde, d.h. die Zeitübertragung auf das VLBI-System muss mit einer ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min erreicht werden, was wiederum stationsabhängig ist.

Ziel des V2C ist es, mit Hilfe des MCS Aussagen über Antennenspezifikationen, hauptsächlich der Antennendrehgeschwindigkeiten, treffen zu können. Die optimale Antennendrehgeschwindigkeit für VLBI2010-Antennen ergibt sich zu 12 °/s in Azimut und 3.5 °/s in Elevation, basierend auf die in Kapitel 6.2 angeführten Untersuchungen. Mit diesen Antennen können sowohl die „konservativen“ mit SKED realisierten Beobachtungspläne als auch die *uniform sky* Beobachtungspläne das geforderte Ziel des V2C, 1 mm Positionsgenauigkeit auf globalem Rahmen (Interim Report V2C, 2008) für die Simulationen mit dem MCS erreichen. Die *uniform sky* Beobachtungspläne zeigen eine deutlich bessere Performance als die mit SKED erzeugten D0In-Beobachtungspläne in Abhängigkeit der Anzahl der Beobachtungen. Um den Vorteil von *uniform sky* Beobachtungsplänen wirklich nutzen, und auch in Zukunft neue Beobachtungsplanungsstrategien entwickeln und realisieren zu können, ist eine Antennendrehgeschwindigkeit von 12 °/s in az als absolutes Minimum für eine zukunftsweisende VLBI-Technologie anzusehen. Weitere Untersuchungen zu SKED bzw. zur Erstellung automatisierter *uniform sky* Beobachtungspläne werden in einem weiteren Projekt (FWF P21049) an der TU Wien durchgeführt.

Die Größe des VLBI-Netzwerkes beeinflusst in erster Linie den Maßstabsfaktor der 7 Parameter Helmert-Transformation und die Bestimmung der EOPs. Das VLBI2010-Testnetzwerk mit 16 Stationen weist im Vergleich zu herkömmlichen Netzwerken eine gleichmäßige globale Stationsverteilung auf, daher ist für die Basislinienlängen-Wiederholbarkeiten und die 3D-Stationenpositionen keine signifikante Verbesserung erkennbar. Betrachtet man die Monte-Carlo-Simulation, die mit einem stationsunabhängigen Turbulenzmodell arbeitet, so kann man mit zusätzlichen VLBI-Stationen eine Verbesserung der Basislinienlängen-Wiederholbarkeit erzielen. Das lässt darauf schließen, dass zusätzliche VLBI-Stationen nur dann einen konstruktiven Beitrag zu den mit VLBI ermittelten Parametern liefern, wenn sie an Orten positioniert werden, die eine geringe Turbulenz der feuchten Atmosphäre aufweisen.

Diese Arbeit hat gezeigt, welchen limitierenden Faktoren die VLBI und die Weiterentwicklung der VLBI zum VLBI2010-System unterworfen sind:

- Der feuchte Anteil der Atmosphäre kann in der VLBI-Auswertung nicht ausreichend genau a priori modelliert bzw. geschätzt werden.
- Die ASD von $1 \cdot 10^{-14}$ @50 min für die VLBI-Stationsuhren bzw. die Zeitübertragung auf das VLBI-System ist ausreichend. Genauere Zeitsysteme liefern derzeit keine genaueren VLBI-Parameter.
- Eine Antennendrehgeschwindigkeit von 12 °/s in az und 3.5 °/s in el ist notwendig, um sehr dichte Beobachtungspläne zu erstellen um die geforderte Genauigkeit für das VLBI2010-System zu erreichen.

Diese Erkenntnisse beruhen auf den Resultaten des MCS, der den verkürzten Beobachtungsvektor $\sigma-c$ aus den größten stochastischen Fehleranteilen des VLBI-Systems modelliert. Dabei wird der Anteil der Atmosphäre durch ein Turbulenzmodell (Onsala, Vienna) erzeugt, das Werte für das ZWD liefert. Wie in der Auswertung mit dem Kalman Filter gezeigt wurde (Kapitel 5.3), wird das *total wet delay* aus dem ZWD und den Nord- und Ostgradienten bestimmt. In der Simulation mit dem Turbulenzmodell werden aber keine zusätzlichen Gradienten berücksichtigt. Eine Verfeinerung des Turbulenzmodells sollte auf alle Fälle das *total wet delay* aus ZWD plus Gradienten erzeugen um eine realistischere Darstellung des feuchten Anteils der Atmosphäre zu bekommen.

In der Simulation der Atmosphäre wurde auch nur der feuchte Anteil der Atmosphäre bestimmt. Der hydrostatische Anteil wurde in der Simulation nicht berücksichtigt, bzw. der Fehler, der durch die *mapping function hydrostatic* (mfh) bei der Schätzung des ZWD in der VLBI-Auswertung eingebracht wird. Da die Schätzung des ZWD der limitierende Faktor der VLBI-Beobachtungen ist, ist es auch erstrebenswert das Turbulenzmodell für den MCS immer weiter zu verfeinern.

Die Verwendung von Turbulenzmodellen, die basierend auf 6 stündigen ECMWF-Wetterdaten den feuchten Anteil der Atmosphäre über einer VLBI-Station simulieren, kann eine Möglichkeit in der Analyse bieten, die Atmosphäre genauer schätzen zu können. Untersuchungen in diese Richtung werden am Institut für Höhere Geodäsie im ÖAW DOC-ffORTE Projekt *Turbulence Theory for Troposphere Delay Modelling in VLBI* (Andrea Pany) durchgeführt.

Eine große Fehlerquelle der VLBI, die in dieser Arbeit und im MCS nicht berücksichtigt wurde, ist der Effekt der Radioquellenstrukturen (*source structure*).

Eine ideale Radioquelle, die den ICRF definiert, hat im Idealfall keine Quellenstruktur oder Variationen in ihrer Position. In der Realität weisen typische Radioquellen aber eine Quellenstruktur auf, die sogar zeitlich variiert. Eine Quellenstruktur lässt sich durch die Variation des *interferometer delay* in Phase und Amplitude, je nach Geometrie der Basislinien, feststellen. Die Quellenstruktur kann für eine ICRF-Radioquelle durchaus zu einem *delay* Fehler von 10 ps (~ 3 mm) führen. Das muss zukünftig unbedingt berücksichtigt werden, um die gesteckten Ziele für VLBI2010 zu erreichen. Bis heute wird diesem Problem entgegengewirkt, indem man bekannte stabile Radioquellen beobachtet. Eine weitere Lösung ist es, Korrekturen für die Quellenstruktur in die VLBI-Auswertung mit einzuführen. Bisherige Beobachtungspläne beinhalten jedoch nicht genügend Quellenbeobachtungen zur Erstellung von hoch qualitativen Bildern der Radioquelle, weshalb die Quellenstruktur noch nicht routinemäßig korrigiert werden kann. Die in dieser Arbeit mit dem MCS getesteten VLBI2010-Beobachtungspläne ermöglichen es durch eine enorme Beobachtungsdichte und Anzahl der Beobachtungen pro *session*, routinemäßig Korrekturen für Quellenstrukturen zu berechnen. Um die Qualität der Korrekturverfahren zu ermitteln und testen zu können, muss der MCS die Fehler der Quellenstruktur als weitere stochastische Größe in den verkürzten Beobachtungsvektor mit einführen. Dann können die Auswirkungen der Quellenstruktur auf die Parameter der VLBI-Analyse genauestens untersucht werden.

Literaturverzeichnis

Alef, W., A. Bertarini, A. Müskens (2007) The Bonn Mark IV Correlator for Astronomy and Geodesy. In: Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (eds.), Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 79, pp. 21-23

Allan, D.W., T. Pepler (1988) National Bureau of Standards dissemination. Rep. 88-2.11, John Hopkins Univ. App. Phys. Lab., Laurel, Md.

Ambrosini, R. (1988) Checks on the long term stability of VLBI receivers. In: Proceedings of the 6th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Radioastrometria, Bologna, P. Tomasi (ed.), pp. 54-58

Behrend, D., L. Cucurull, J. Vilà, R. Haas (2000) An inter-comparison study to estimate zenith wet delays using VLBI, GPS, and NWP models. Earth Planets Space, 52, pp. 691–694

Behrend, D., R. Haas, D. Pino, L.P. Gradinarsky, S.J. Keihm, W. Schwarz, L. Cucurull, A. Rius (2002) MM5 derived ZWDs compared to observational results from VLBI, GPS and WVR. Physics and Chemistry of the Earth, 27, pp. 3301–3308

Behrend, D., J. Böhm, P. Charlot, T. Clark, B. Corey, J. Gipson, R. Haas, Y. Koyama, D. MacMillan, Z. Malkin, A. Niell, T. Nilsson, B. Petrachenko, A. Rogers, G. Tuccari, J. Wresnik (2007) Recent Progress in the VLBI2010 Development. IUGG XXIV General Assembly ISBN, Perugia, Italy, 2007

Böhm, J. (2004) Troposphärische Laufzeitverzögerungen in der VLBI. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 68

Böhm, J., J. Wresnik, and A. Pany (2007) Simulation of wet zenith delays and clocks. IVS Memorandum 2006-013v03. September 4, 2007 (<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-013v03.pdf>)

Brenner R. (1995) Methoden zur Monte Carlo Simulation und deren Implementierungen. Diplomarbeit am Institut für Analysis. Technische Mathematik und Versicherungsmathematik, Abteilung für Regelungsmathematik Hybridrechnen- und Simulationstechnik der TU Wien

Campbell, J. (1979) Die Radiointerferometrie auf langen Basen als geodätisches Messprinzip hoher Genauigkeit. DGK, Reihe C, Heft 314, München

Campbell, J., A. Nothnagel, H. Schuh (1992) Die Radiointerferometrie auf langen Basen (VLBI) als geodätisches Meßprinzip hoher Genauigkeit, Allgemeine Vermessungsnachrichten, 11-12, pp. 484-502

Campbell, J. (2000) From Quasar to Benchmarks: VLBI Links Heaven and Earth. In International VLBI Service for Geodesy and Astronomy, General Meeting Proceedings, N. R. Vandenberg, K. D. Baver (eds.), NASA/CP-2000-209893

Charlot, P. (2002) Modeling Radio Source Structure for Improved VLBI Data Analysis. In: International VLBI Service for Geodesy and Astronomy 2002 General Meeting Proceedings, N.R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), NASA/CP-2002-210002, pp. 233–242
<ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/general-meeting/2002/pdf/charlot.pdf>

Clark, T.A. et al. (1985) Precision Geodesy using the Mk-III Very Long Baseline Interferometer System. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-23, No.4, pp. 438-449

Elgered, G., B.O. Rönnäng, J.I.H. Askne (1982) Measurements of atmospheric water vapor with microwave radiometry. Radio Science, 17(5), pp. 1258–1264

Elgered, G., J.L. Davis, T.A. Herring, I.I. Shapiro (1991) Geodesy by Radio Interferometry: Water Vapor radiometry for Estimation of the Wet Delay. Journal of Geophysical Research, 96(B4), pp. 6541–6555

Elgered, G., J.L. Davis (1993) Microwave radiometry for correction of atmospheric path-length variations in VLBI: recent results. In: Proceedings of the 9th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astronomy, Bad Neuenahr, Germany, J. Campbell, A. Nothnagel (eds.), pp. 98–108

Emardson, T.R., G. Elgered, J.M. Johansson (1999) External atmospheric corrections in geodetic very-long baseline interferometry. Journal of Geodesy, 73, pp. 375–383.

Ermakow M. (1975) Die Monte-Carlo-Methode und verwandte Fragen. R. Oldenbourg Verlag München Wien

Estermann, G. (2003) Untersuchung von auflastbedingten Deformationen mittels VLBI. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien

Fey, A.L., D.A. Boboltz, R.A. Gaume, K.A. Kingham (2002) USNO Analysis Center for Source Structure Report. In: International VLBI Service for Geodesy and Astronomy 2001 Annual Report, N.R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), NASA/TP-2002-210001, pp. 249–252
<ftp://ivscc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2001/pdf/acusnoss.pdf>

Gelb, A. (1974) Applied Optimal Estimation. MIT Press, Cambridge Mass

Haas, R., A. Nothnagel, H. Schuh, O. Titov (1999) Explanatory Supplement to the Section “Antenna Deformation” of the IERS Conventions (1996), DGFI Report No.71, Deutsches Geographisches Forschungsinstitut (DGFI), München, pp. 26-29

Hall, A. (1873) On an experiment determination of π . Messeng. Math. 2, pp. 113-114

Hammersley, J.M., D.C. Handscomp (1964) Monte Carlo methods. Meuthen & Co., London/J. Wiley & Sons, New York

Heinkelmann, R. (2008) Bestimmung des atmosphärischen Wasserdampfes mittels VLBI als Beitrag zur Klimaforschung. Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 82

Herring, T. A., J.L. Davis, and I.I. Shapiro (1990) Geodesy by Radio Interferometry: The Application of Kalman Filtering to the Analysis of Very Long Baseline Interferometry Data. Journal of Geophysical Research, Volume 95, No. B8. Volume 95, No.B8, pp. 12561-12581

Hobiger, T. (2002) Bestimmung von Ionosphärenparametern durch die VLBI. Diplomarbeit am Institut für Geodäsie und Geophysik der TU Wien

Ichikawa, R., H. Kuboki, M. Tsutsumi, Y. Koyama (2006) Zenith wet delay comparisons at Tsukuba and Kashima VLBI-Stations during the CONT05 VLBI campaign. IVS NICT TDC News, No.27, pp. 19-22

Johansson, L.A., F. Stodne, S. Wolf (1996) The Pisa Project, Variations in the height of the foundation of the 20 meter radio telescope. Research Report No 178

Koch, K.R. (1976) Dynamische Optimierung am Beispiel der Straßentrassierung, Vermessung und Raumordnung 38, pp. 281-290

Koch, K.R. (1982) Optimization of the configuration of geodetic networks. Veröffentlichung DGK, Reihe B, Heft 258, München, pp. 82-89

Metropolis, N., S. Ulman (1949) The Monte Carlo method. J. Amer. Stat. Assoc. 44, No 247, pp. 335-341

Naylor, T.H., J.L. Balintfy, D.S. Burdick, K. Chu (1966) Computer Simulation Techniques. John Wiley & Sons, New York

von Neumann, J. (1951) Various techniques used in connection with random digits. Monte Carlo method. Nut. Bur. Stand. Math. Series 12, pp. 36-38

Niell, A.E., A.J. Coster, F.S. Solheim, V.B. Mendes, P.C. Toor, R.B. Langley, C.A. Upham (2001) Comparison of measurements of atmospheric wet delay by radiosonde, water vapor radiometer, GPS, and VLBI. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 18, pp. 830-850

Niell, A.E., J. Tang (2002) Gradient Mapping Functions for VLBI and GPS. In: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2002 General Meeting Proceedings, N.R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), NASA/CP-2002-210002, pp. 233-242
<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/general-meeting/2002/pdf/niell.pdf>.

Niell, A.E., A. Whitney, B. Petrachenko, W. Schlüter, N. Vandenberg, H. Hase, Y. Koyama, C. Ma, H. Schuh, G. Tuccari (2006) VLBI2010: Current and Future Requirements for Geodetic VLBI-Systems. Report of Working Group 3 to the IVS Directing Board, 2005 (<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2006-001v01.pdf>)

Nilsson, T., R. Haas, G. Elgered (2007) Simulations of atmospheric path delays using turbulence models. In: Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (eds.), Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 79, pp. 175-180

Nothnagel, A., J-H. Cho, A. Roy, R. Haas (2007) WVR calibration applied to European VLBI observing sessions. Dynamic Planet: Monitoring and Understanding a Dynamic Planet with Geodetic and Oceanographic Tools, IAG Symposium, Cairns, Australia, 22-26 August, 2005, Series: International Association of Geodesy Symposia, Vol. 130, P. Tregoning, C. Rizos, (eds.), Springer, ISBN/ISSN: 978-3-540-49349-5, pp. 152–157

Nottarp, K., R. Kilger (1982) Design criteria of a radio telescope for geodetic and astrometric purposes. Techniques d'Interferometrie a tres grande Base, CNES, Toulouse, pp. 41-54

Pany, A., J. Wresnik, J. Böhm (2008) Vienna VLBI2010 PPP Simulator, IVS Memorandum 2008-012v01. August, 2008 (<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/memos/ivs-2008-012v01.pdf>).

Pearlman, M., Z. Altamimi, N. Beck, R. Forsberg, W. Gurtner, S. Kenyon, D. Behrend, F.G. Le-moine, C. Ma, C.E. Noll, E.C. Pavlis, Z. Malkin, A.W. Moore, F.H. Webb, R.E. Neilan, J.C. Ries, Rothacher, M., P. Willis (2006) Global Geodetic Observing System Considerations for the Geodetic Network Infrastructure. Geomatica, 60(2), pp. 193–204

Petrachenko, B. (2007) Achieving a Quantum Leap in Observation Density. In: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2006 General Meeting Proceedings, D. Behrend, K.D. Baver (eds.), NASA/CP-2006-214140, pp. 67–71
<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/general-meeting/2006/pdf/petrachenko.pdf>

Petrachenko, B., J. Böhm, D. MacMillan, A. Niell, A. Pany, A. Searle, J. Wresnik (2008) VLBI2010 Antenna Slew Rate Study, In: Measuring the future, Proceedings of the 5th IVS General Meeting, A. Finkelstein, D. Behrend (eds.), pp. 410-415

Petrov, L., J.P. Boy (2003) Study of atmospheric pressure loading signal in VLBI observations, Journal of Geophysical Research, 10.1029/2003JB002500

Petrov, L. (2007) Using source maps for scheduling and data analysis: approaches and strategies. In: Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (eds.), Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 79, pp. 141-146

Press, W. H., S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery (1992) Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. 2nd edition, Cambridge University Press

Prochorov, Yu. V., Yu. A. Rozanov (1969) Probability theory : basic concepts, limit theorems, random processes. Springer, 1969 - XI - Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften; 157

Rogers, A.E.E. (1980) Phase and Group Delay Calibration of Very Long Baseline Interferometer by east Coast VLBI Group. Radio Interferometry Techniques for Geodesy, NASA Conference Publication 2115, pp. 255-262

Schuh, H. (1987) Die Radiointerferometrie auf langen Basen zur Bestimmung von Punktverschiebungen und Erdrotationsparametern , DGK Reihe C, Nr. 328, Verlag der Bayrischen Akademie der Wissenschaften, München

Schuh, H., P. Charlot, H. Hase, E. Himwich, K. Kingham, C. Klatt, C. Ma, Z. Malkin, A. Niell, A. Nothnagel, W. Schlüter, K. Takashima, N. Vandenberg (2002) IVS Working Group 2 for Product Specification and Observing Programs. In: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2001 Annual Report, N.R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), NASA/TP-2002-210001, pp. 13–45, ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/annual-report/2001/pdf/wg2_report_2.pdf

Shapiro, I.I., C.A. Knight, (1970) Geophysical Applications of Long-Baseline Radio Interferometry. Earthquake Displacement Field and the Rotation of the Earth, L. Mansinha, D.E. Smylie, A.E. Beck (eds.), ISBN 90-277-0159-8

Snajdrova, K., J. Böhm, P. Willis, R. Haas, H. Schuh (2006) Multi-technique comparison of tropospheric zenith delays derived during the CONT02 campaign. Journal of Geodesy, 79, doi 10.1007/s00190-005-0010-z, pp. 613–623

Steuftmehl, H. (1994) Optimierung von Beobachtungsplänen in der Langbasisinterferometrie (VLBI). Veröffentlichung DGK, Reihe C, Heft 406

Tatarskii, V. I. (1971) The Effects of the Turbulent Atmosphere on Wave Propagation. Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem

Titov, O., V. Tesmer, J. Böhm (2004) OCCAM v. 6.0 software for VLBI data analysis, in International VLBI Service for Geodesy and Astrometry. In: Proceedings of the third IVS General Meeting, Ottawa, Canada, N.R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), pp. 267–271

Treuhaft, R.N., G.E. Lanyi (1987) The effect of the dynamic wet troposphere on radio interferometric measurements. Radio Science, Volume 22, No. 2., pp. 251-265

Vandenberg, N. (1999) Interactive/Automatic Scheduling Program. Program Reference Manual, NASA/Goddard Space Flight Center, NVI, Inc.

Vessot, R.F.C. (1976) Frequency and time standards. Methods Exp. Phys., 12C, pp. 198-227

Vessot, R.F.C. (1980) Hydrogen Maser Frequency standards. In: Proceedings of Conference on Radio Interferometry, NASA Conf. Publ. 2115, pp. 203-222

Vessot, R.F.C. (1981) Atomic hydrogen maser VLG-11 series. Technical description, Smithsonian Astrophys. Obs., Cambridge, Mass.

Vessot, R.F.C., E.M. Mattison, W.J. Klepczynski, G.M.R. Winkler, I.F. Silvera, H.P. Godfried, R.L. Walsworth, Jr. (1986) Present Clock stability and realistic prospects for the future. In:

Proceedings of the Fourth Marcel Grossman Meeting on General Relativity, E. Ruffini (ed.), pp. 477-495

Welch, G., G. Bishop, (2006) An Introduction to the Kalman Filter.

<http://www.cs.unc.edu/~welch>

Whitney, A.R. (2000) How Do VLBI Correlators Work. In: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2000 General Meeting Proceedings, N. R. Vandenberg, K.D. Baver (eds.), NASA/CP-2000-209893

Whitney, A.R. (2007) The Mark 5 VLBI Data System. In: Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (eds.), Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 79, pp. 33–38

http://mars.hg.tuwien.ac.at/~evga/proceedings/S21_Whitney.pdf

Whitney, A.R., S.S. Doleman, B. Fanous, H.F. Hinteregger, and A.A.E. Rogers (2007) A Wide-Band VLBI Digital Backend System. In: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2006 General Meeting Proceedings, D. Behrend, K.D. Baver (eds.), NASA/CP-2006-214140, pp. 72–76

<ftp://ivsc.gsfc.nasa.gov/pub/general-meeting/2006/pdf/Whitney2.pdf>.

Wohlleben, R., H. Mattes (1973) Interferometrie in Radioastronomie und Radartechnik, Vogel Verlag, Würzburg

Wresnik, J., R. Haas, J. Boehm, and H. Schuh (2007a) Modeling thermal deformation of VLBI antennas with a new temperature model Journal of Geodesy, Numbers 6-8 / Juni 2007 Special Issue: Very Long Baseline Interferometry (VLBI), pp. 423-431

Wresnik, J., J. Böhm, H. Schuh (2007b) Monte Carlo Simulations for VLBI2010. In: Proceedings of the 18th European VLBI for Geodesy and Astrometry Working Meeting, Vienna, Austria, J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (eds.), Geowissenschaftliche Mitteilungen, Schriftenreihe der Studienrichtung Vermessung und Geoinformation, Technische Universität Wien, Nr. 79, pp. 168-174

Wresnik, J., J. Böhm, A. Pany, H. Schuh (2007c) Towards a new VLBI-System for geodesy and astrometry, Advances in Geosciences, AOGS 2007, accepted by the editor 2007.

Weblinks

IVS: <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/>

IVS Memoranda: <http://ivsc.gsfc.nasa.gov/publications/memos/index.html>

ECMWF: <http://www.ecmwf.int/>

ERA40: <http://data.ecmwf.int/research/era/>

ETS-Lindgren horn: <http://www.ets-lindgren.com/page/?i=3164-05>

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------|--|
| ALMA | <i>Atacama Large Millimeter/submillimeter Array</i> |
| ASD | <i>Allan Standard Deviation</i> |
| Bsl | <i>Baseline</i> |
| CIB | <i>correlator interface board</i> |
| cl | <i>VLBI-Stationsuhr</i> |
| Cn | <i>refractive index structure constant</i> |
| CRF | <i>Celestial Reference Frame</i> |
| DBE | <i>Digital Back Ends</i> |
| DRAO | <i>Dominion Radio Astrophysical Observatory</i> |
| ECMWF | <i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i> |
| EOP | <i>Erdorientierungsparameter</i> |
| EZWD | <i>equivalent zenith wet delay</i> |
| FTP | <i>File Transfer Protocol</i> |
| Gbps | <i>Giga bits per second</i> |
| GGAO | <i>Goddard Geophysical and Astronomical Observatory</i> |
| GGOS | <i>Global Geodetic Observing System</i> |
| GM | <i>Gauß-Markov</i> |
| GNSS | <i>Global Navigation Satellite System</i> |
| IAG | <i>International Association of Geodesy</i> |
| ICRF | <i>International Celestial Reference Frame</i> |
| ITRF | <i>International Terrestrial Reference Frame</i> |
| IVS | <i>International VLBI Service for Geodesy and Astrometry</i> |
| KF | <i>Kalman Filter</i> |
| LSM | <i>kleinste Quadrate Modell (least square method)</i> |
| MC | <i>Monte-Carlo</i> |
| MCS | <i>Monte-Carlo-Simulator</i> |
| mfh | <i>mapping function hydrostatic</i> |
| mfw | <i>mapping function wet</i> |
| MIT | <i>Massachusetts Institute of Technology</i> |
| NASA/GSFC | <i>National Aeronautics and Space Administration/Goddard Space Flight Center</i> |
| NASA/JPL | <i>National Aeronautics and Space Administration/Jet Propulsion Laboratory</i> |
| NICT | <i>National Institute of Information and Communications Technology</i> |
| NOAA/NGS | <i>National Oceanic and Atmospheric Administration/National Geodetic Survey</i> |
| NRC | <i>National Research Canada</i> |
| OSO | <i>Onsala Space Observatory</i> |
| PPP | <i>Precise Point Positioning</i> |
| PSD | <i>Power Spectral Density</i> |
| R&D | <i>Research and Development</i> |
| RDV | <i>research and development VLBA</i> |
| RMS | <i>root mean square</i> |
| SESWG | <i>Solid Earth Science Arbeitsgruppen Report</i> |
| SNR | <i>Signal-zu-Rauschverhältnis</i> |
| STD | <i>Standardabweichung</i> |
| SU | <i>Station Unit</i> |

| | |
|---------|--|
| TRF | <i>Terrestrial Reference Frame</i> |
| TU Wien | Technische Universität Wien |
| V2C | VLBI2010-Komitee |
| VDI | Verein der Deutschen Ingenieure |
| VLBA | <i>Very Long Baseline Array</i> |
| VLBI | <i>Very Long Baseline Interferometry</i> |
| WG2 | <i>Working Group 2</i> |
| WG3 | <i>Working Group 3</i> |
| wn | <i>white noise</i> , weißes Rauschen |
| WVR | <i>water vapor radiometer</i> |
| ZWD | <i>zenith wet delay</i> , feuchte Laufzeitverzögerung in Zenitrichtung |

Anhang

Anhang A

| Station | $C_n [10^{-7} \text{ m}^{-1/3}]$ | H [m] | Wind Nord [m/s] | Wind Ost [m/s] | ZWD ₀ |
|---------|----------------------------------|-------|--------------------|-------------------|------------------|
| BA | 0.86 | 1815 | 0.25 | 4.74 | 150 |
| BN | 2.47 | 1679 | 3.46 | -2.2 | 150 |
| HA | 2.03 | 1851 | 2.03 | -2.84 | 150 |
| HO | 1.16 | 2043 | 3.03 | 11.14 | 150 |
| KK | 2.3 | 1779 | 4.38 | -3.36 | 150 |
| NY | 0.35 | 1845 | 7.46 | 0.53 | 150 |
| TS | 1.45 | 1912 | 1.03 | 10.49 | 150 |
| WZ | 0.94 | 1856 | 6.75 | 4.22 | 150 |
| FT | 2.47 | 2142 | 2.93 | -7.12 | 150 |
| GC | 0.55 | 1963 | 3.8 | -6.49 | 150 |
| KE | 0.93 | 2089 | 3.4 | 17.5 | 150 |
| KW | 2.47 | 1629 | -1.64 | -9.42 | 150 |
| MS | 1.91 | 1891 | 7.64 | 0.91 | 150 |
| TA | 2.47 | 2078 | 5.45 | -1.17 | 150 |
| TC | 1.41 | 2176 | 1.21 | 4.96 | 150 |
| WS | 1.17 | 2269 | 5.39 | 11.88 | 150 |
| AU | 1.43 | 1864 | 8.3 | 0.22 | 150 |
| GD | 1.48 | 2131 | 4.77 | 0.7 | 150 |
| HY | 1.82 | 1901 | 5.95 | 1.91 | 150 |
| MA | 2.47 | 1877 | 1.13 | -4.87 | 150 |
| KA | 2.47 | 1979 | 3.42 | -9.07 | 150 |
| QA | 0.65 | 1776 | 8.46 | 5.36 | 150 |
| RI | 2.47 | 2414 | -5.15 | -3.24 | 150 |
| YR | 1.78 | 1940 | 5.72 | 0.67 | 150 |
| DG | 2.47 | 2291 | 2.13 | 5.58 | 150 |
| IS | 1.95 | 1978 | 3.24 | -3.11 | 150 |
| LP | 1.52 | 2031 | 6.58 | 3.59 | 150 |
| MK | 2.47 | 2272 | 2.36 | -0.47 | 150 |
| ND | 1.85 | 1752 | -0.43 | 4.76 | 150 |
| PA | 2.47 | 2217 | 1.88 | -7.38 | 150 |
| SA | 0.85 | 1843 | 0.95 | 7.87 | 150 |
| ZC | 1.12 | 1970 | 4.66 | 4.15 | 150 |
| BR | 1.64 | 2010 | 8.27 | 1.75 | 150 |
| IN | 2.35 | 2242 | 1.1 | 0.9 | 150 |
| IQ | 2.45 | 2112 | -0.34 | 1.73 | 150 |
| KU | 2.09 | 1771 | 1.31 | 1.14 | 150 |
| MC | 0.37 | 2270 | 4.47 | 3.44 | 150 |
| OH | 0.59 | 1869 | 6.99 | 1.97 | 150 |
| SV | 0.64 | 1705 | 4.12 | 10.48 | 150 |
| SY | 0.49 | 2116 | 0.26 | -9.09 | 150 |

Anhang B

Turbulenzmodell Vienna (Böhm et al., 2007)

```

function wzd = turbseg(stat2,t,az,el,adays,dhseg,dh);

% creating of turbulence following Nilsson 2007 (EVGA)
% input parameters
% stat2: 2-letter code for the station
% t:     vector time in hours
% az:    vector azimuth in radians
% el:    vector elevation in radians
% idays: number of days. Please mind that all days will be simulated with
%        the same covariance matrix
% dhseg: time segments in hours. if 2 hours is not short enough it might be
%        better to use 1. If possible use larger values. 24 hours would be
%        optimum, but perhaps not feasible.
% dh:    height increments in m. e.g. 200 m
% output parameters
% wzd:   idays columns with wet zenith delays
%
% You need a file stat16_4turb.dat in this directory!

% Johannes Boehm, Sep 6 2007, Have Fun!

% constants and settings
L0    = 3e6;           % [m] saturation scale length
wzd = [];

t = t(:); az = az(:); el = el(:);
'wzd'
% open the masterfile for the stations to get the information
ifound = 0;
fid = fopen('stat40_4turb_riop.dat');
while ~feof(fid)
    line = fgetl(fid);
    if strcmp(line(1:2),stat2)
        line
        vec = sscanf(line(3:length(line)),'%f');
        Cn = vec(1)*1e-7;
        h = vec(3);
        vn = vec(4)*3600; % wind north in m/h
        ve = vec(5)*3600; % wind east in m/s
        vv = [vn ve 0];
        wzd0 = vec(6); % initial wzd in mm
        ifound = 1;
    end
end
if ifound==0
    ['Station ',stat2,' information not found']
    return
end

num = length(t);
for i = 1:num
    ri(i,1:3) = [cos(az(i))/tan(el(i)) sin(az(i))/tan(el(i)) 1];
end
% ---
L23 = L0^(2/3);
Cnall = Cn^2/2*1e6*dh^2;
% number of height increments
nh = floor(h/dh);
% the first observation is sacrificed :-
az1 = 0;
el1 = pi/2;
r0 = [cos(az1)/tan(el1) sin(az1)/tan(el1) 1];
k = 0;
for i = 1:nh+1
    for j = 1:nh+1
        k = k + 1;
        zs(k) = dh*(i-1);
        z(k) = dh*(j-1);
        v(1:3,k) = vv';
    end
end
r0z = r0'*z;
r0zs = r0'*zs;

```



```

rho4 = sqrt(sum((r0z-r0zs).^2));
rho4x = rho4.^(2/3)./(1+rho4.^(2/3)/L0^(2/3));
% --
% split everything into two-hour segments ...
ti = floor(t./dhseg)+1;
% how many epochs per segment
tn = [];
isegments = ti(num);
for i = 1:isegments
    k = find(ti==i);
    tn(i) = length(k);
end
% if only one segment
if isegments==1
    num3 = tn(1);
    C(1:num3,1:num3) = 0;
    % how many epochs are before the segment i1
    for i = 1:num3
        if mod(i,100)==0
            ['progress ',num2str(i),' out of ',num2str(num3)]
        end
        riz = ri(i,1:3)*z;
        dti0 = t(i);
        ddl = (riz-r0zs+v*dti0);
        rho1 = sum(ddl.*ddl).^(1/3);
        rho1x = rho1./(1+rho1/L23);
        for j = i:num3
            % compute time differences in hours
            dtj0 = t(j);
            dtij = t(j)-t(i);
            % compute position vectors
            rjz = ri(j,1:3)*z;
            rjzs = ri(j,1:3)*zs;
            % compute separations
            dd2 = (rjz-r0zs+v*dtj0);
            dd3 = (riz-rjzs-v*dtij);
            rho2 = sum(dd2.*dd2).^(1/3);
            rho3 = sum(dd3.*dd3).^(1/3);
            out = rho1x + rho2./(1+rho2/L23) - rho3./(1+rho3/L23) - rho4x;%
            result = sum(out);
            C(i,j) = Cnall*result;
        end
    end
    D = chol(C)';
    for iday = 1:adays
        x = randn(num3,1);
        l = D*x;
        % add an initial value
        wzd1 = l + wzd0;
        wzd = [wzd,wzd1];
    end
else
% --
% first two segments
i1 = 1;
['progress: ',num2str(i1),' out of ',num2str(isegments)]
num1 = tn(i1);
num2 = tn(i1+1);
num3 = num1+num2;
C = []; D = []; D11 = []; D12 = []; D22 = [];
C(1:num3,1:num3) = 0;
% how many epochs are before the segment i1
k = sum(tn(1:i1-1));
for i = 1:num3
    riz = ri(k+i,1:3)*z;
    dti0 = t(k+i);
    ddl = (riz-r0zs+v*dti0);
    rho1 = sum(ddl.*ddl).^(1/3);
    rho1x = rho1./(1+rho1/L23);
    for j = i:num3
        % compute time differences in hours
        dtj0 = t(k+j);
        dtij = t(k+j)-t(k+i);
        % compute position vectors
        rjz = ri(k+j,1:3)*z;
        rjzs = ri(k+j,1:3)*zs;
        % compute separations
        dd2 = (rjz-r0zs+v*dtj0);

```

```

        dd3 = (riz-rjzs-v*dtij);
        rho2 = sum(dd2.*dd2).^(1/3);
        rho3 = sum(dd3.*dd3).^(1/3);
        out = rho1x + rho2./(1+rho2/L23) - rho3./(1+rho3/L23) - rho4x;%
        result = sum(out);
        C(i,j) = Cnall*result;
    end
end
D = chol(C)';
C11 = C(num1+1:num3,num1+1:num3);
cov(i1).D = sparse(D);
cov(i1).num1 = num1;
cov(i1).num2 = num2;
cov(i1).num3 = num3;
% --
% loop over two adjacent two-hour blocks
for i1 = 2:isegments-1
    ['progress: ',num2str(i1),' out of ',num2str(isegments)]
    num1 = tn(i1);
    num2 = tn(i1+1);
    num3 = num1+num2;
    C = []; D = []; D11 = []; D12 = []; D22 = [];
    C(1:num3,1:num3) = 0;
    % how many epochs are before the segment i1
    k = sum(tn(1:i1-1));
    C(1:num1,1:num1) = C11;
    for i = 1:num1
        riz = ri(k+i,1:3)*z;
        dti0 = t(k+i);
        ddl = (riz-r0zs+v*dti0);
        rho1 = sum(dd1.*ddl).^(1/3);
        rho1x = rho1./(1+rho1/L23);
        for j = num1+1:num3
            % compute time differences in hours
            dtj0 = t(k+j);
            dtij = t(k+j)-t(k+i);
            % compute position vectors
            rjz = ri(k+j,1:3)*z;
            rjzs = ri(k+j,1:3)*zs;
            % compute separations
            dd2 = (rjz-r0zs+v*dtj0);
            dd3 = (riz-rjzs-v*dtij);
            rho2 = sum(dd2.*dd2).^(1/3);
            rho3 = sum(dd3.*dd3).^(1/3);
            out = rho1x + rho2./(1+rho2/L23) - rho3./(1+rho3/L23) - rho4x;
            result = sum(out);
            C(i,j) = Cnall*result;
        end
    end
    for i = num1+1:num3
        riz = ri(k+i,1:3)*z;
        dti0 = t(k+i);
        ddl = (riz-r0zs+v*dti0);
        rho1 = sum(dd1.*ddl).^(1/3);
        rho1x = rho1./(1+rho1/L23);
        for j = i:num3
            % compute time differences in hours
            dtj0 = t(k+j);
            dtij = t(k+j)-t(k+i);
            % compute position vectors
            rjz = ri(k+j,1:3)*z;
            rjzs = ri(k+j,1:3)*zs;
            % compute separations
            dd2 = (rjz-r0zs+v*dtj0);
            dd3 = (riz-rjzs-v*dtij);
            rho2 = sum(dd2.*dd2).^(1/3);
            rho3 = sum(dd3.*dd3).^(1/3);
            out = rho1x + rho2./(1+rho2/L23) - rho3./(1+rho3/L23) - rho4x;
            result = sum(out);
            C(i,j) = Cnall*result;
        end
    end
end
D = chol(C)';
C11 = C(num1+1:num3,num1+1:num3);
cov(i1).D = sparse(D);
cov(i1).num1 = num1;
cov(i1).num2 = num2;
cov(i1).num3 = num3;

```

```

end
% how many days should be simulated
for iday = 1:adays
    x = randn(cov(1).num3,1);
    l = cov(1).D*x;
    l1 = l(cov(1).num1+1:cov(1).num3);
    for i1 = 2:isegments-1
        D11 = cov(i1).D(1:cov(i1).num1,1:cov(i1).num1);
        D21 = cov(i1).D(cov(i1).num1+1:cov(i1).num3,1:cov(i1).num1);
        D22 = cov(i1).D(cov(i1).num1+1:cov(i1).num3,cov(i1).num1+1:cov(i1).num3);
        x = randn(cov(i1).num2,1);
        l1 = D21*inv(D11)*l1 + D22*x;
        l = [l; l1];
    end
    % add an initial value
    wzd1 = l + wzd0;
    wzd = [wzd,wzd1];
end
end

```

Simulation der VLBI-Stationsuhren

```

function [tt,tc] = predictclock;

% tt: time in seconds
% tc: clock readings in seconds

% noise level of the clock
SY = 2e-15;
dt = 1;
cn = SY;

phir = SY^2*(15*60);
phii = SY^2/(15*60)*3;

wnsr = sqrt(phir);
wnsi = sqrt(phii);

% Generate the time series
num = 86400/dt + 1;
ti = zeros(num,1);
tr = zeros(num,1);
tt = [1:num]*dt-dt; % Times of values

% random walk
% ---
tr(1) = randn*cn;
y = tr(1);
for t = 2:length(tt);
    wn = randn*wnsr/sqrt(dt);
    y = y + wn*dt + randn*cn;
    tr(t) = y;
end
% integrated random walk
% ---
ti(1) = randn*cn;
y = ti(1);
v = 0;
for t = 2:length(tt)
    wn = randn*wnsi/sqrt(dt);
    y = y + v*dt + (wn)/2*dt^2 + randn*cn;
    v = v + wn;
    ti(t) = y;
end
% sum of random walk and integrated random walk
tc = tr + ti;
tc = tc';

```

Simulation für weißes Rauschen

```
function [tt,tw] = wnoise;

% tt: time in seconds
% tw: white noise [mm]

cn = 1;
dt = 1; % 1 sec
% Generate the time series
num = 86400/dt + 1;
tw = zeros(num,1);
tt = [1:num]*dt-dt; % Times of values

% random walk
% ---

tw(1) = randn*cn;
y = tw(1);
for t = 2:length(tt);
    y = randn*cn;
    tw(t) = y;
end
tw = tw';
```

Lebenslauf

Dipl.- Ing. Jörg Wresnik
Moosweg 68
A-9535 Schiefling am See
Tel.Nr.: +43-650-2843482
e-mail: wresnik@mars.hg.tuwien.ac.at

Geboren am: 20.April 1978 in Klagenfurt
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: Österreich

Ausbildung

| | |
|---------------------------|---|
| 1984 - 1988 | Öffentliche Volksschule 8 in Villach |
| 1988 - 1992 | Bundesrealgymnasium, Villach |
| 1992 - 1997 | HTBL u.VA Villach, Ausbildungszweig Hochbau |
| 10. Juni 1997 | Reifeprüfung |
| 1997 - 1998 | Präsenzdienst beim Österreichischen Bundesheer in Villach |
| Okt. 1998 | Immatrikulation an der TU-Wien - Inskription der Studienrichtung Vermessungswesen und Geoinformation |
| 26.03.2001 | 1.Diplomprüfung |
| ab April 2001 | Studienzweig Geodäsie und Geophysik |
| August. 2001- Juli 2002 | Auslandsstudium für 2 Semester an der Universidad Politecnica de Valencia (Spanien) im Rahmen des ERASMUS-Programms |
| November 2004 – März 2005 | Arbeiten an thermischen Antennendeformationen am Onsala Space Observatory (OSO, Schweden) mit Dr.-Ing. Dipl.-Ing. Rüdiger Haas im Rahmen der Diplomarbeit |
| 20. Juni 2005 | 2.Diplomprüfung |

Berufliche Erfahrung

Seit 01.07.2005 Projektassistent an der TU-Wien FWF Projekt VLBI2010 P18404-N10
Nov 2006 Forschungsaufenthalt am NASA Goddard Spaceflight Center, U.S.A.
Dez 2007 Forschungsaufenthalt am National Research Council (NRC) Canada

Seit 2000 Aufnahmeleiter beim Österreichischen Rundfunk (Freiberuflich)

Sommerpraktika:

1997 - 2002 Urlaubsvertretung als Bauleiter bei der Baufirma Sztriberny Bau, Reifnitz
2000 6 wöchiges Vermessungspraktika beim Vermessungsbüro Wolf, Klagenfurt

Fremdsprachen

Englisch in Wort und Schrift
Spanisch in Wort und Schrift

Weitere Ausbildungen

1995 Kärntner Jagdprüfung
1996 Lehrwart für Basketball
2006 Kärntner Jagdaufseherprüfung