

5 Prozessierung der CHAMP-GPS-Daten zur Ableitung von TEC-Informationen

5.1 Verwendete Daten

Bevor im Folgenden detailliert auf die Prozessierung der CHAMP-Daten zur Ableitung ionosphärischer Informationen eingegangen wird, sollen hier zunächst alle im Rahmen der vorliegenden Arbeit zur Ableitung dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen verwendeten Datentypen in Kürze vorgestellt werden.

5.1.1 CHAMP-GPS-Daten

Bei den verwendeten GPS-Daten handelt es sich um Navigationsmessungen des in Kapitel 3.2.2 beschriebenen GPS-Empfängers an Bord des CHAMP-Satelliten unter Verwendung der Zenitantenne (siehe Abb. 5.1). Diese Daten dienen in erster Linie der hochgenauen Orbitbestimmung des CHAMP-Satelliten mit GPS sowie der Bereitstellung einer präzisen Zeitinformation an Bord des Satelliten und werden aufgrund dieser permanenten Aufgabe auch permanent empfangen. Die Datenrate ist ebenfalls dem originären Verwendungszweck angepasst und beträgt 0,1 Hz. Damit bieten die GPS-Messungen mit der Zenitantenne gleichzeitig eine umfangreiche Datenbasis zur Fernerkundung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre.

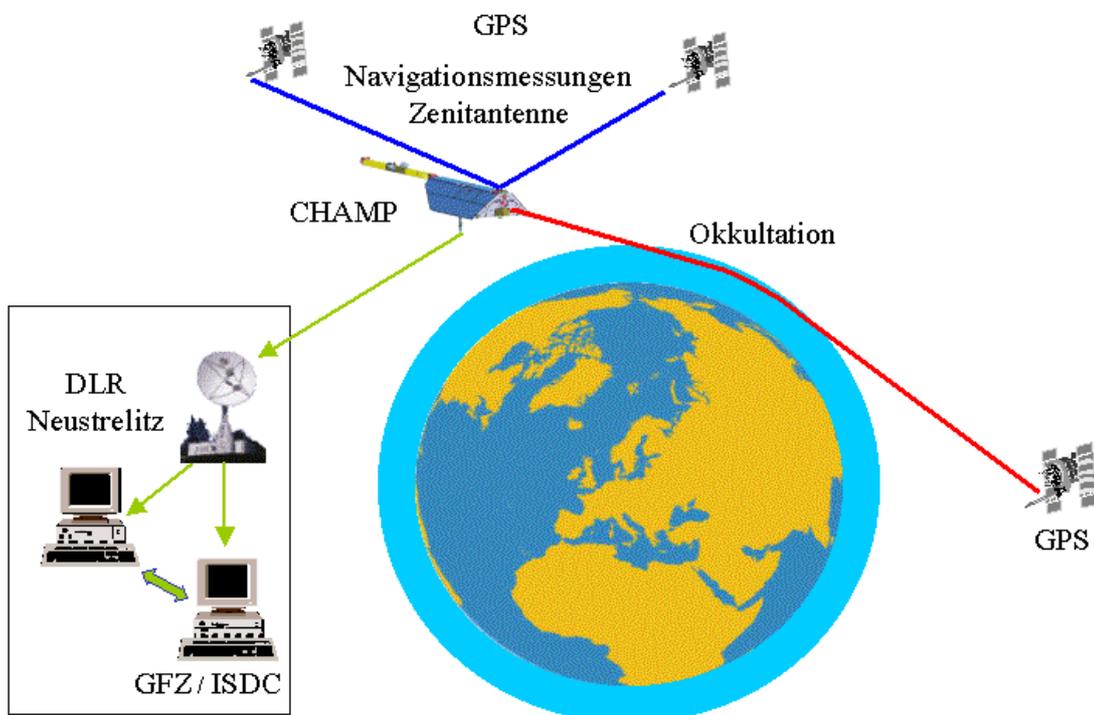


Abb. 5.1: GPS-Messungen an Bord des CHAMP-Satelliten.

Wie Abb. 5.1 zeigt und bereits in Kapitel 3 ausgeführt wurde, ist der CHAMP-Satellit mit einer in Gegenflugrichtung weisenden Okkultationsantenne ausgestattet, welche die Beobachtung untergehender (okkultierender) GPS-Satelliten ermöglicht. Diese GPS-Messungen dienen zur Fernerkundung der vertikalen Struktur sowohl der neutralen

Atmosphäre als auch der Ionosphäre unterhalb der CHAMP-Orbithöhe und wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet.

Die CHAMP-Daten werden von der Bodenstation Neustrelitz des DFD/DLR empfangen und schließlich vom ISDC des GFZ Potsdam zur Verfügung gestellt (siehe Abb. 5.1). Die verwendeten Daten liegen nach der Dekodierung in dem für GPS-Beobachtungen allgemein üblichen RINEX-Format (Receiver INdependent EXchange) vor. Eine aktuelle Formatbeschreibung wird z.B. von *Gurtner* (2002) gegeben. Neben den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Beobachtungsgrößen L1, L2, P1 und P2 (siehe Kapitel 4.2) enthalten die CHAMP-RINEX-Daten weiterhin Messungen der C/A-Codephase auf L1 (C1) sowie Angaben zum Signal-zu-Rausch-Verhältnis für die L1- und L2-Phasenbeobachtungen. Die Codephasenmessungen P1 und P2 werden als Pseudoentfernungen in Metern angegeben, während die Trägerphasenmessungen, wie in Gleichung (4.5) beschrieben, in Wellenlängenzyklen angegeben werden und zur weiteren Auswertung unter Berücksichtigung der jeweiligen Wellenlänge in Meter umzurechnen sind.

Der zeitliche Rahmen der GPS-Daten ist variabel und richtet sich nach dem zeitlichen Abstand der Datenübertragung von CHAMP zur Bodenstation Neustrelitz. Meist wird der CHAMP-Satellit während drei aufeinanderfolgender Orbits von Neustrelitz empfangen (Orbitdauer 93 Minuten) und kommt dann für mehrere Stunden nicht mehr in das Sichtfeld der Bodenstation. Die zeitliche Länge der Daten gestaltet sich entsprechend. Zur weiteren Prozessierung werden aus den aufeinanderfolgenden empfangsbezogenen RINEX-Dateien Tagesdateien gebildet um Kompatibilität mit den GPS-Orbitdaten herzustellen, die ebenfalls in Tagesdateien arrangiert sind.

Mit Ausnahme weniger im Wesentlichen durch Softwareänderungen oder Orbitmanöver bedingter Ausfälle umfassen die zur Auswertung verfügbaren Daten den gesamten Missionszeitraum seit dem 17. 07. 2000.

5.1.2 Orbitdaten

Zur weiteren Auswertung der strahlenwegbezogenen TEC-Messungen (siehe Kapitel 6) ist die Kenntnis des räumlichen Verlaufs der entsprechenden Strahlen zwingend erforderlich. Daher werden Orbitinformationen sowohl des GPS-Systems als auch des CHAMP-Satelliten benötigt. Alle erforderlichen Orbitdaten werden im Rahmen der CHAMP-Mission als operationelle Datenprodukte von der Orbitgruppe des GFZ über das ISDC zur Verfügung gestellt.

CHAMP-Orbit

Bei den verwendeten Orbitdaten des CHAMP-Satelliten handelt es sich um Orbitvorhersagen, die im CHORB-Format (CHAMP ORBit) bereitgestellt werden (*König et al.*, 2001). Die CHAMP-Orbitdateien enthalten die Positions- und Geschwindigkeitsvektoren des Satelliten im erdfesten Bezugssystem mit einer zeitlichen Auflösung von einer Minute. Dieses Orbitprodukt wird täglich zur Verfügung gestellt und enthält jeweils den vorausgerechneten Orbit des aktuellen Tages sowie der drei Folgetage. Die Genauigkeit des Orbits liegt für die ersten beiden Tage bei ca. vier Metern (*Schmidt*, 2002) und verschlechtert sich naturgemäß im weiteren Vorhersagezeitraum. Zum Zweck der Lokalisierung strahlenwegbezogener TEC-Messungen ist die vorliegende Genauigkeit allerdings in jedem Fall ausreichend. Es ist daher nicht erforderlich, die im Nachhinein berechneten und im Zentimeterbereich genauen CHAMP-Orbits, welche ebenfalls über das ISDC bereitgestellt werden, zu verwenden.

GPS-Orbits

Die verwendeten GPS-Satellitenbahnen werden im SP3-Format (Standard Product # 3), dem allgemeinen Standard für GPS-Orbits, bereitgestellt. Eine entsprechende Formatbeschreibung wird z.B. von *Spofford* (2002) gegeben. Die GPS-Orbitdateien enthalten die Positions- und Geschwindigkeitsvektoren aller GPS-Satelliten im erdfesten Bezugssystem mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten. Sie werden täglich zur Verfügung gestellt und umfassen jeweils einen Tag. Die absolute Orbitgenauigkeit beträgt 10 cm für jede Koordinatenachse.

5.1.3 Differentielle Codebiases der GPS-Satelliten

Zur Bestimmung des absoluten TEC aus den differentiellen GPS-Träger- und Codephasenmessungen ist, wie Gleichung (5.22) verdeutlicht, die Kenntnis der differentiellen Codebiases sowohl der GPS-Satelliten als auch des GPS-Empfängers an Bord von CHAMP erforderlich. Im Zusammenhang mit der routinemäßigen Prozessierung von GPS-Bodenstationsdaten zur Ableitung regionaler oder globaler v TEC-Karten werden die GPS-Biases auf stabile und zuverlässige Weise von verschiedenen GPS-Prozessierungszentren wie z.B. CODE (Center for Orbit Determination in Europe) oder JPL bestimmt. Sie sind in den Kopfzeilen der IONEX (IONosphere map EXchange)-Dateien enthalten, mit denen die jeweiligen v TEC-Karten bereitgestellt werden. Eine entsprechende Formatbeschreibung findet sich bei *Schaer et al.* (1998). Die IONEX-Dateien werden täglich zur Verfügung gestellt und umfassen jeweils einen Tag (z.B. [<ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/iono/>]). Die enthaltenen GPS-Biases werden in ns angegeben und für den jeweiligen Tag als konstant angesehen.

Im DLR IKN Neustrelitz werden im Zusammenhang mit einer routinemäßigen v TEC-Kartenprozessierung (*Jakowski*, 1996) die GPS-Biases ebenfalls auf einer täglichen Basis bestimmt.

Zur Kalibrierung der CHAMP-TEC-Messungen (siehe Kapitel 5.4.2) wurden alternativ sowohl GPS-Biases von JPL und CODE als auch die hauseigenen GPS-Biases verwendet.

5.1.4 Geophysikalische Modellparameter

Sowohl zur Bestimmung des differentiellen Codebiases des GPS-Empfängers an Bord von CHAMP (Kapitel 5.4.2) als auch zur Initialisierung der Voxel-Struktur im Rahmen der TEC-Datenassimilation (Kapitel 6.2) wurde im Rahmen dieser Arbeit das Ionosphären/Plasmasphärenmodell PIM verwendet, zu dessen Betrieb die geophysikalischen Eingangsparameter 10,7 cm Solar Flux und Kp-Index erforderlich sind (siehe Kapitel 2.9.3). Die verwendeten Daten beider Parameter werden vom National Geophysical Data Center (NGDC) in sogenannten Kp-Dateien via FTP (File Transfer Protocol) bereitgestellt [ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/GEOMAGNETIC_DATA/INDICES/KP_AP/]. Eine entsprechende Formatbeschreibung findet sich bei *NGDC* (2002).

5.2 Prozessierungsübersicht und automatische Prozessierung

5.2.1 Softwaremodule und Datenfluss

In den folgenden Kapiteln werden die Prozessierungsschritte von den Eingangsdaten bis zur dreidimensionalen Elektronendichteverteilung ausführlich beschrieben und diskutiert. Zunächst soll ein Überblick zu der im Rahmen dieser Arbeit aufgebauten Prozessierungskette gegeben werden, welcher die Datenflüsse und Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Prozessierungsschritten verdeutlicht sowie die Aufgaben der zugehörigen Softwaremodule beschreibt.

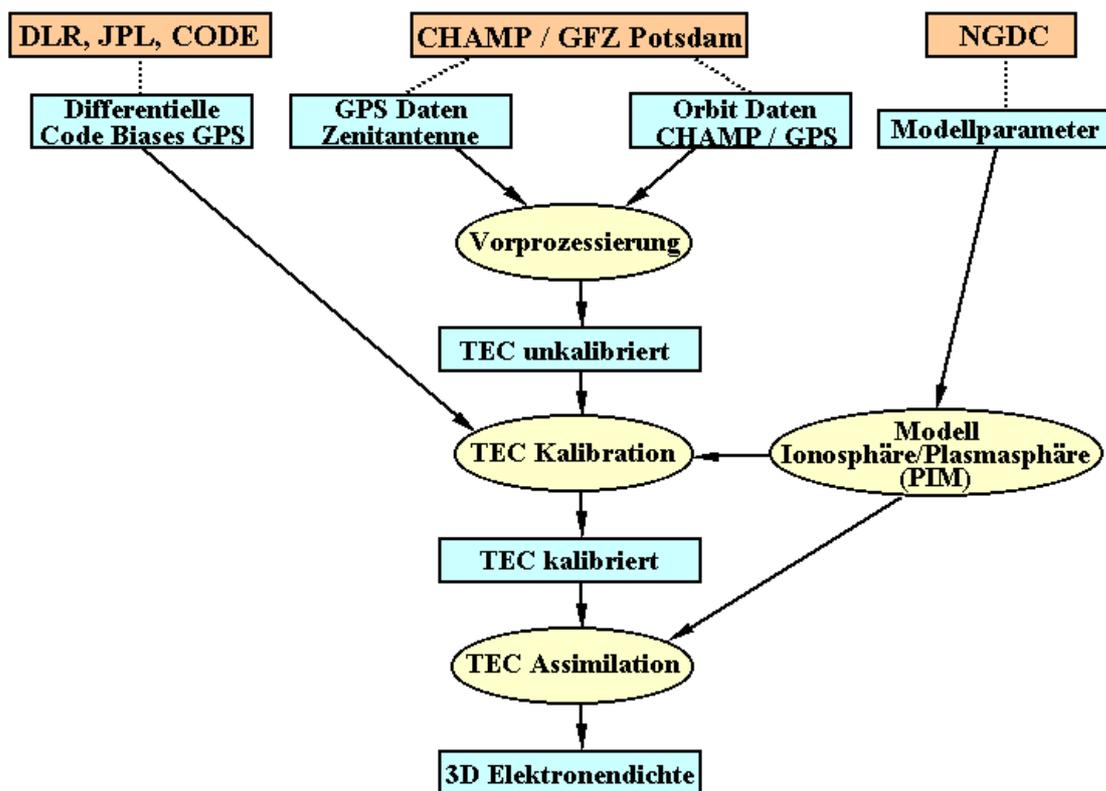


Abb. 5.2: Gesamtübersicht über die entwickelte Prozessierungskette zur Ableitung der dreidimensionalen Elektronendichteverteilung aus den GPS-Navigationsmessungen von CHAMP.

Wie Abb. 5.2 zeigt, stehen am Beginn der Prozessierungskette drei verschiedene Datentypen (siehe Kapitel 5.1), die vom GFZ Potsdam bereitgestellt werden: CHAMP-GPS-Daten (0,1 Hz) sowie CHAMP- und GPS-Orbitdaten. Diese Eingangsdaten werden dem Vorprozessierungsmodul zugeführt. Die Aufgaben der Vorprozessierung bestehen im Wesentlichen in der Qualitätssicherung der GPS-Daten (Beseitigung von fehlerhaften Messungen und Phasensprüngen, siehe Kapitel 5.3) sowie in der Berechnung des unkalibrierten TEC aus den GPS-Beobachtungen unter Lösung der Phaseneindeutigkeiten (siehe Kapitel 5.4.1). Weiterhin werden die zu den TEC-Messungen gehörenden Strahlenwege lokalisiert, indem die Positionen des CHAMP-Satelliten und des beobachteten GPS-Satelliten zum Zeitpunkt der jeweiligen Messung aus den Orbitdaten bestimmt werden. Dies erfolgt durch zeitliche Interpolation zwischen den in den Orbitdaten gegebenen Positionsvektoren.

Die unkalibrierten TEC-Messungen werden in Form binärer Dateien an das Kalibrierungsmodul weitergeleitet, welches aus zwei Teilmodulen besteht. Das erste dieser Module hat

die Aufgabe, den differentiellen Codebias des CHAMP-GPS-Empfängers unter Zuhilfenahme von Modellinformationen (PIM) und extern (DLR, JPL, CODE) bestimmten differentiellen Codebiases der GPS-Satelliten zu ermitteln (siehe Kapitel 5.4.2). Das PIM ist dabei direkt in das Softwaremodul integriert. Dabei wird analog zu den externen GPS-Biases auch der CHAMP-Bias für jeweils einen Tag als konstant angesehen und es werden Tagesdateien der Biases erzeugt. Das zweite Teilmodul der Kalibrierung dient lediglich der Summation unkalibrierter TEC-Messungen und der zugehörigen Biases (CHAMP-Bias und Bias des beobachteten GPS-Satelliten für den entsprechenden Tag), so dass kalibrierte TEC-Messungen resultieren. Das Kalibrierungsmodul gibt schließlich binäre Dateien aus, die strahlenwegbezogene absolute TEC-Messungen sowie die geometrischen Informationen zum Verlauf der Strahlen (Kartesische Koordinaten des Anfangs- und Endpunktes im erdfesten Bezugssystem) enthalten.

Wie Abb. 5.2 zeigt, sind zum Betrieb von PIM bestimmte geophysikalische Parameter als Modelleingangsdaten erforderlich, die im Rahmen dieser Arbeit aus der vom NGDC bereitgestellten Datenbasis (siehe Kapitel 5.1.4) extrahiert wurden.

Die absoluten TEC-Messungen jeweils eines vollständigen CHAMP-Orbits werden vom Assimilationsmodul im letzten Prozessierungsschritt in eine initiale dreidimensionale Modellannahme (PIM) der Elektronendichteverteilung assimiliert. Die Assimilation erfolgt in einem iterativen Prozess, der die initiale Modellannahme so modifiziert, dass sie schließlich den strahlenwegbezogenen TEC-Messungen des jeweiligen CHAMP-Umlaufs entspricht (siehe Kapitel 6.2). Dies geschieht unter Verwendung einer dreidimensionalen globalen Voxel-Struktur (siehe Kapitel 6.1), die zu Beginn des Assimilationsprozesses mit der Modellannahme initialisiert wird. Die Ausgabe des Assimilationsmoduls besteht aus einer dreidimensionalen globalen Elektronendichteverteilung (diskrete Werte gemäß der Voxel-Struktur), die den Bereich zwischen CHAMP-Orbithöhe und GPS-Orbithöhe umfasst und den rekonstruierten Zustand der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre für den jeweiligen Assimilationszeitraum repräsentiert. Es wurden weiterhin verschiedene Softwarewerkzeuge entwickelt, die es ermöglichen, bestimmte Informationen aus der globalen dreidimensionalen Elektronendichteverteilung zu ziehen, wie z.B. die Elektronendichteverteilung in der Orbitebene, die Elektronendichte entlang der CHAMP-Bahn, Elektronendichteprofile der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre an frei wählbaren geographischen Punkten oder den vertikalen TEC oberhalb der CHAMP-Bahn.

Sämtliche Softwaremodule wurden in der Programmiersprache FORTRAN unter UNIX geschrieben und angewendet. Es wurde generell der Standardcompiler F77 (SUN) verwendet.

5.2.2 Automatisches Prozessierungssystem und operationelle Aspekte

Die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen Softwaremodule können bei Vorliegen der jeweils erforderlichen Eingabedaten auf Kommandozeilenebene (unter UNIX) in der geschilderten Reihenfolge betrieben werden, um aus den genannten Eingangsdaten die dreidimensionale Elektronendichteverteilung abzuleiten. Jedes Modul ist dabei durch jeweils zwei Konfigurationsdateien, die zu Beginn des Modullaufs eingelesen werden, von außen konfigurierbar. Diese Konfigurationsdateien enthalten einerseits die Namen der Eingabedateien und andererseits bestimmte Schalter und Konfigurationswerte zum Betrieb des jeweiligen Moduls. Die Prozessierung größerer Datenmengen (z.B. der CHAMP-GPS-Messungen eines Monats) ist auf diese Weise recht mühsam, da die Konfigurationsdateien bezüglich der Namen der Eingabedateien jeweils von Hand editiert werden müssen und alle Module von Hand zu starten sind. Durch die Verwendung von Stapelverarbeitungsbefehlen (Shell-Scripte), welche die Konfigurationsdateien im Rahmen eines

vorgegebenen Prozessierungszeitraumes automatisch editieren und die Module entsprechend starten, kann dieser manuelle Aufwand bereits deutlich reduziert werden. Für eine operationelle Prozessierung der fortlaufend anfallenden CHAMP-Daten ist es allerdings erforderlich, die beschriebene Prozessierungskette in ein automatisches Prozessierungssystem einzubinden. In der Vorbereitungsphase der CHAMP-Mission wurde ein solches System zur automatischen Prozessierung der CHAMP-Okkultationsdaten im DLR IKN Neustrelitz entwickelt (Wehrenpfennig et al., 2001). Es wurde dabei so allgemein konzipiert, dass es vielseitig zur operationellen Datenprozessierung eingesetzt werden kann. Das Prozessierungssystem ist modular aufgebaut, wobei die verschiedenen Komponenten entsprechend der zu erfüllenden operationellen Aufgaben kombinierbar und konfigurierbar sind. Die einzubindenden wissenschaftlichen Module können in verschiedenen Programmiersprachen entwickelt worden sein (z.B. C, FORTRAN, IDL). Von besonderer Bedeutung im Hinblick auf die operationelle Prozessierung ist auch die hohe Robustheit und Betriebssicherheit des Systems.

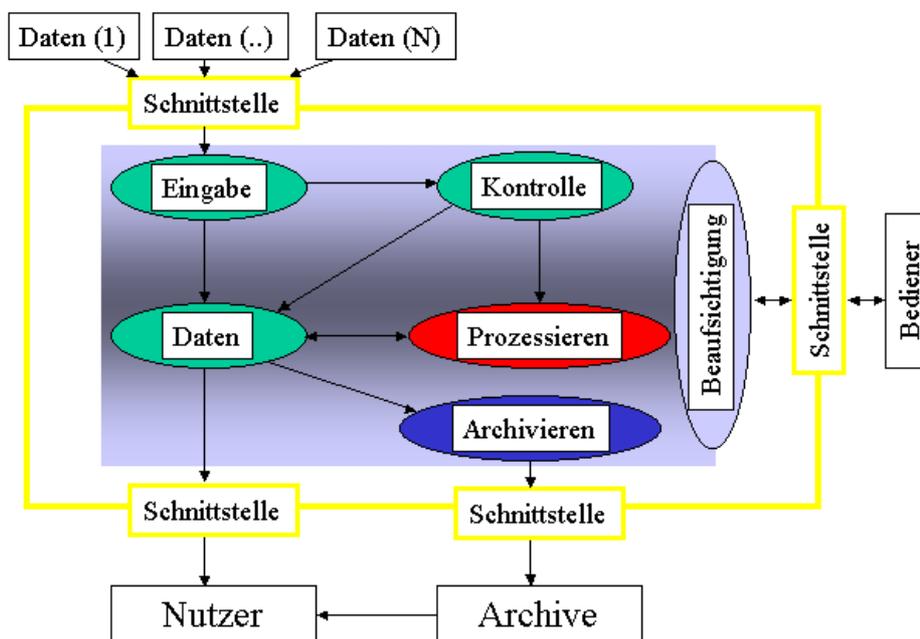


Abb. 5.3: Struktur und Komponenten des automatischen Prozessierungssystems zur Auswertung der CHAMP-Okkultationsdaten (nach Wehrenpfennig et al., 2001).

Abb. 5.3 zeigt schematisch die verschiedenen Hauptkomponenten und die Arbeitsweise des entwickelten Prozessierungssystems. Die verschiedenen Eingangsdaten werden zunächst durch das Eingabesystem empfangen, wobei FTP-Prozesse dazu dienen, die Daten entsprechend der Konfiguration des Eingabesystems von verschiedenen FTP-Servern anziehen.

Die empfangenen Daten werden an das Datenmanagementsystem weitergeleitet. Dieses dient der Datenbereitstellung für die Prozessierung durch die wissenschaftlichen Module, empfängt die aus der Prozessierung resultierenden Datenprodukte und bietet gleichzeitig die Schnittstelle zum internen Archivierungssystem, welches seinerseits die entstandenen Datenprodukte in externe Datenzentren (z.B. ISDC) überführt.

Das Kontrollsystem koordiniert die Arbeiten und das Zusammenspiel aller Teilsysteme des Prozessors. Das System kann über eine graphische Benutzeroberfläche vom Bediener kontrolliert werden.

Die Prozessierung erfolgt prinzipiell datengetrieben, d.h., sobald alle benötigten Eingabedaten für ein bestimmtes wissenschaftliches Modul zur Verfügung stehen, wird dieses

gestartet. Dazu überwacht das Kontrollsystem den Datenbestand im Datenmanagementsystem und vergleicht diesen mit den konfigurationsgemäß zum Start der verschiedenen wissenschaftlichen Module notwendigen Eingabedaten.

Die wissenschaftlichen Module sind in das Subsystem "Prozessieren" integriert. Ihre Einbindung in das automatische Prozessierungssystem erfolgt durch die Verwendung bestimmter Bibliotheksrufer, die in die verschiedenen wissenschaftlichen Module integriert werden und damit eine einheitliche Schnittstelle zum Prozessierungssystem bereitstellen. Bestimmte Konfigurationsparameter, wie z.B. die Namen der Eingabedateien, werden den wissenschaftlichen Modulen über die bereits erwähnten Konfigurationsdateien bereitgestellt, welche vom automatischen Prozessierungssystem entsprechend erzeugt und von den wissenschaftlichen Modulen nach deren Start eingelesen werden.

Alle Module der in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Prozessierungskette sind für den Betrieb im automatischen Prozessierungssystem konzipiert, implementiert und getestet. Eine Einbindung in das automatische Prozessierungssystem zur Verarbeitung der ionosphärischen GPS-Messungen der CHAMP-Mission ist für die Zukunft vorgesehen.

Um die CHAMP-GPS-Messungen (Zenitantenne) jeweils eines vollen Orbits möglichst schnell nach dem Datenempfang durch die Bodenstation gemäß Abb. 5.2 prozessieren zu können, werden im operationellen Betrieb durch das automatische Prozessierungssystem orbitbezogene RINEX-Dateien (an Stelle von Tagesdateien) als Eingangsdateien für die Prozessierungskette bereitgestellt. Durch die Verwendung von vorausberechneten CHAMP- und GPS-Orbits sowie der bereits vorliegenden CHAMP- und GPS-Biases des Vortages ist es dann möglich, die Prozessierung der CHAMP-GPS-Daten direkt nach deren Empfang zu starten und somit recht aktuelle Informationen über den Ionisationszustand der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre zu gewinnen. Dieser Aspekt ist insbesondere für zukünftige Weltraumwetteranwendungen von erheblichem Interesse.

5.3 Sicherung der GPS-Datenqualität

Bevor die Messungen der verschiedenen GPS-Beobachtungsgrößen zur Bestimmung strahlenwegbezogener TEC-Informationen verwendet werden können, ist eine Qualitätskontrolle der entsprechenden Daten erforderlich. Die wesentlichen Qualitätsmängel der GPS-Daten liegen in fehlerhaften Einzelmessungen und Phasensprüngen (engl. Cycle Slips). Fehlerhafte Einzelmessungen können sowohl bei den Träger- als auch bei den Codephasenmessungen auftreten und stellen deutliche singuläre Diskontinuitäten im Verlauf der jeweiligen Messung dar. Unter einem Cycle Slip versteht man dagegen die sprunghafte ganzzahlige Änderung des Phasenmehrdeutigkeitsparameters (siehe Gleichung (4.5)) bei den Trägerphasenmessungen. Codephasenmessungen, die keine Mehrdeutigkeiten enthalten, sind folglich frei von Cycle Slips. Abb. 5.4 (links) gibt ein anschauliches Beispiel für die Wirkung eines Cycle Slips auf die differentielle Trägerphasenmessung (ionosphärische Linearkombination L_1). Die Größe des zu beobachtenden Sprunges ist dabei im Prinzip beliebig variabel.

Das Auftreten eines Cycle Slips kann verschiedene Ursachen haben: Unterbrechung der „Sichtverbindung“ zwischen GPS-Satellit und Empfänger, niedriges Signal-zu-Rausch-Verhältnis (z.B. durch ionosphärische Einflüsse oder Mehrwegeeffekte), Fehler in der Empfängersoftware oder Fehler im GPS-Satellitenoszillator.

Der Phasenmehrdeutigkeitsparameter bleibt generell nur während einer durchgehenden Empfangsperiode konstant und nimmt nach einer Unterbrechung bei wieder einsetzendem Empfang einen neuen zufälligen Wert an.

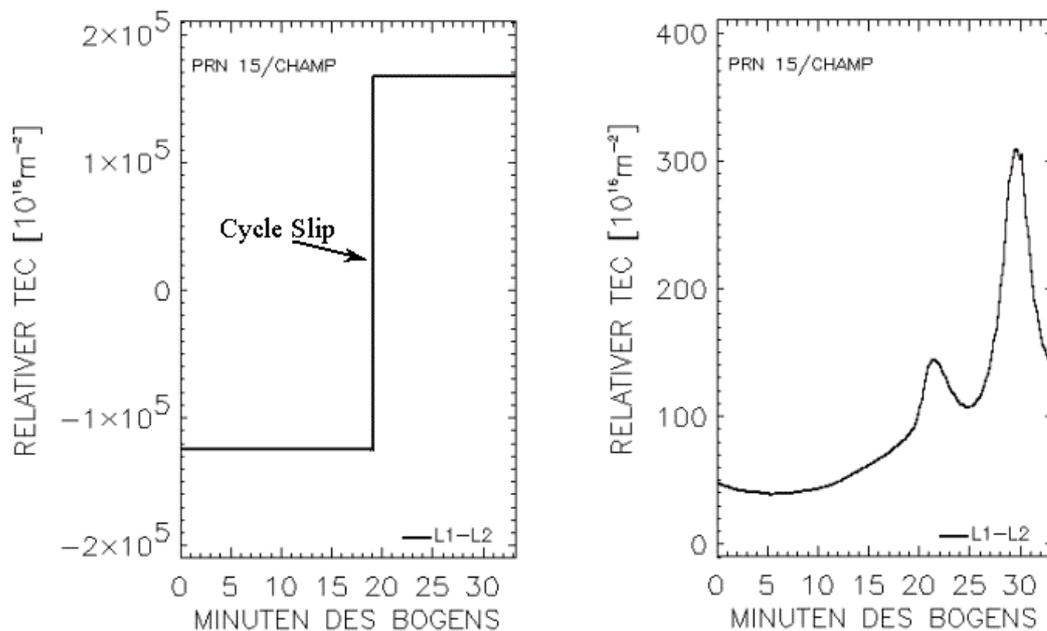


Abb. 5.4: Fortlaufende Beobachtung (Bogen) von PRN 15 durch CHAMP am 10. November 2001. **links:** Cycle Slip in der differentiellen Trägerphase (Rohdaten); **rechts:** differentielle Trägerphase desselben Bogens nach Detektierung und Korrektur des Cycle Slips während der Vorprozessierung der GPS-Daten.

Die Detektierung und Korrektur von Cycle Slips ist von elementarer Bedeutung, da das im Rahmen dieser Arbeit verwendete Verfahren (Kapitel 5.4.1) zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten auf dem Weg der TEC-Bestimmung aus den differentiellen Trägerphasen nur dann zu einer Lösung kommt, wenn die verwendeten GPS-Daten frei von Cycle Slips sind bzw. mindestens deren Auftreten bekannt ist. Fehlerhafte Einzelmessungen sind schlicht

mit fehlerhaften TEC-Messungen gleichzusetzen, die von der weiteren Datenprozessierung auszuschließen sind.

Cycle Slips können durch geeignete Vorprozessierung der GPS-Daten eliminiert werden (z.B. *Bauer, 1997* oder *Teunissen und Kleusberg, 1998*). Zur Detektierung und Behebung von fehlerhaften Einzelmessungen und Cycle Slips kam im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein Algorithmus zur Anwendung, der in Anlehnung an ein von *Blewitt (1990)* eingeführtes Verfahren zur Prozessierung von GPS-Bodenstationsdaten entwickelt wurde. Dieser Algorithmus ist aus folgenden Gründen zur Vorprozessierung der CHAMP-GPS-Daten gewählt worden:

- Eignung für kinematische GPS-Anwendungen, wie im Fall von CHAMP
- Sofortige Anwendbarkeit auf die CHAMP-Daten, da keinerlei GPS-Daten anderer Empfänger (z.B. Bodenstationen) zur Bildung bestimmter Differenzen benötigt werden
- Automatische Datenprozessierung bei hoher Zuverlässigkeit.

Abb. 5.4 (rechts) veranschaulicht das Resultat der Detektierung und Korrektur eines Cycle Slips durch die Anwendung des genannten Algorithmus auf die CHAMP-GPS-Daten, welche im Folgenden beschrieben werden soll.

Dazu ist es zunächst erforderlich, die Beobachtungsgleichungen (4.4) und (4.5) der GPS-Code- und Trägerphasen etwas zu modifizieren. Aus Gleichung (4.8) folgt für den TEC:

$$\text{TEC} = I f_1^2 f_2^2 / K (f_1^2 - f_2^2) \quad (5.1)$$

mit $I = P_1 + dcb_S + dcb_R - \Delta\varepsilon_P$.

Setzt man (5.1) in den ionosphärischen Ausbreitungsfehler erster Ordnung (2.13) ein und verwendet diesen zur Formulierung der Beobachtungsgleichungen (4.4) und (4.5), so erhält man unter Vernachlässigung der instrumentellen Biases und Restfehler folgende Beobachtungsgleichungen für die einzelnen Observablen:

$$L_1 \equiv \phi_1 \lambda_1 = R - I f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) + N_1 \lambda_1 \quad (5.2)$$

$$L_2 \equiv \phi_2 \lambda_2 = R - I f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) + N_2 \lambda_2 \quad (5.3)$$

$$P_1 = R + I f_2^2 / (f_1^2 - f_2^2) \quad (5.4)$$

$$P_2 = R + I f_1^2 / (f_1^2 - f_2^2) \quad (5.5)$$

Die Größe R stellt dabei die Summe der frequenzunabhängigen Terme (geometrische Distanz zwischen Satellit und Empfänger, Uhrenfehler und troposphärischer Ausbreitungsfehler) dar, die in jeder der Observablen gleichermaßen enthalten sind. Die Größen von λ_1 und f_1 bzw. λ_2 und f_2 sind den Gleichungen (4.1) bzw. (4.2) zu entnehmen.

Ein Cycle Slip, im Folgenden mit ΔN bezeichnet, ist definiert als eine ganzzahlige Diskontinuität des Phasenmehrdeutigkeitsparameters N :

$$(\Delta N_1, \Delta N_2) = (N_1' - N_1, N_2' - N_2) \quad (5.6)$$

N_1' und N_2' bezeichnen dabei die neuen Werte von N_1 bzw. N_2 nach dem Cycle Slip. Zur Bestimmung der Cycle Slip Parameter ΔN_1 und ΔN_2 werden zwei Linearkombinationen der Beobachtungsgleichungen (5.2) bis (5.5) verwendet. Schließlich erhält man eine Formulierung, die unabhängig von der Größe R ist und damit unempfindlich für Uhreninstabilitäten und relative Bewegungen zwischen Sender und Empfänger.

Die sogenannte Wide-Lane-Kombination der Trägerphasen ist definiert als:

$$\phi_s \equiv \phi_1 - \phi_2 \quad (5.7)$$

Die Wide-Lane-Phase ϕ_δ lässt sich in Analogie zu den Beobachtungsgleichungen der Trägerphasen auch in Längeneinheiten darstellen:

$$L_\delta \equiv \phi_\delta \lambda_\delta \quad (5.8)$$

wobei $\lambda_\delta \equiv c/(f_1 - f_2) \approx 86,2$ cm die Wide-Lane-Wellenlänge symbolisiert. Sie entspricht etwa der vierfachen Wellenlänge der ursprünglichen Trägersignale und gibt damit der Wide-Lane-Kombination ihren Namen. Unter Berücksichtigung der Beobachtungsgleichungen (5.2) und (5.3) erhält man für L_δ nach einigen Umformungen:

$$L_\delta = (f_1 L_1 - f_2 L_2)/(f_1 - f_2) = R + If_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2) + \lambda_\delta N_\delta \quad (5.9)$$

mit dem Wide-Lane-Phasenmehrdeutigkeitsparameter $N_\delta \equiv N_1 - N_2$.

Um die Größe N_δ aus (5.9) bestimmen zu können, wird unter Berücksichtigung von (5.4) und (5.5) die Wide-Lane-Kombination der Codephasen in Analogie zu (5.9) gebildet:

$$P_\delta \equiv (f_1 P_1 + f_2 P_2)/(f_1 + f_2) = R + If_1 f_2 / (f_1^2 - f_2^2) \quad (5.10)$$

N_δ lässt sich nun bestimmen, indem man (5.10) von (5.9) subtrahiert:

$$N_\delta = (L_\delta - P_\delta) / \lambda_\delta \quad (5.11)$$

Aufgrund der Beobachtungsgeometrie mit den verschiedenen Orbithöhen fliegt CHAMP quasi unter den jeweiligen GPS-Satelliten hinweg. Aus Sicht der Zenitantenne auf CHAMP beschreiben die einzelnen GPS-Satelliten jeweils einen Bogen: sie gehen auf, erreichen eine maximale Elevation und gehen danach wieder unter. Während der Prozessierung der Daten eines solchen GPS-Bogens wird der Parameter N_δ für jeden einzelnen Messzeitpunkt aus den entsprechenden GPS-Beobachtungsgrößen berechnet sowie dessen fortlaufendes Mittel $\langle N_\delta \rangle$ bestimmt. Weiterhin erfolgt fortlaufend eine Bestimmung der Wurzel aus der mittleren quadratischen Abweichung (RMSE) der einzelnen N_δ von deren fortlaufendem Mittel $\langle N_\delta \rangle$, die hier mit σ bezeichnet wird. Wenn dabei Messungen vom Zeitpunkt k an berücksichtigt werden sollen, ergeben sich zum späteren Messzeitpunkt n $\langle N_\delta \rangle_n$ und σ_n wie folgt:

$$\langle N_\delta \rangle_n = \frac{1}{1+n-k} \sum_{i=k}^n N_\delta(i) \quad (5.12)$$

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{1}{1+n-k} \sum_{i=k}^n (N_\delta(i) - \langle N_\delta \rangle_i)^2} \quad (5.13)$$

Der Wert σ kann erst in sinnvoller Weise bestimmt werden, wenn zur Mittelung eine gewisse Anzahl von Messungen vorliegt. Bei der Prozessierung der CHAMP-Daten ist dieser Wert auf 5 aufeinanderfolgende Messungen festgesetzt worden. Zuvor wird a priori ein σ von 0,5 angenommen, wie auch von *Blewitt* (1990) empfohlen.

Wenn der aktuelle Wert N_δ außerhalb der 4σ Umgebung des fortlaufenden Mittels $\langle N_\delta \rangle$ liegt und sich dabei mindestens um 0,75 von $\langle N_\delta \rangle$ unterscheidet, wird die aktuelle Messung zunächst als fehlerhafte Einzelmessung betrachtet. Sollte sich das der fehlerhaften Einzelmessung folgende N_δ um weniger als 1 von seinem Vorgänger unterscheiden, so wird angenommen, dass zum Zeitpunkt der zunächst vermuteten fehlerhaften Einzelmessung ein Cycle Slip aufgetreten ist. Von diesem Punkt an beginnt dann eine neue Mittelwertbestimmung (d.h. k wird in den Gleichungen (5.12) und (5.13) entsprechend modifiziert), die bis zum Auftreten des nächsten Cycle Slips bzw. bis zum Ende der Messungen des Bogens fortgeführt wird. Die Werte $\langle N_\delta \rangle$ und σ werden so für den gesamten Bogen berechnet und zur weiteren Prozessierung zwischengespeichert.

Nachdem die Daten des gesamten Bogens prozessiert sind, werden zunächst die fehlerhaften Einzelmessungen für die weitere Datenauswertung gelöscht. Im nächsten Schritt wird versucht, die detektierten Cycle Slips zu beheben. Dazu betrachten wir zunächst die ionosphärische Linearkombination der Trägerphasen L_I (siehe Gleichung (4.7)) unter Berücksichtigung der modifizierten Beobachtungsgleichungen (5.2) und (5.3):

$$L_I \equiv L_1 - L_2 = I + N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2 = I + \lambda_1 N_\delta + N_2(\lambda_1 - \lambda_2) \quad (5.14)$$

Die jeweiligen Teilbögen von L_I beiderseits des Cycle Slips sollen nun durch einen Polynomfit miteinander verbunden werden. Im Rahmen der CHAMP Datenprozessierung werden jeweils höchstens 6 (entspricht einer Minute bei 0,1 Hz Messungen), mindestens aber 2 L_I -Werte vor dem Cycle Slip als Stützstellen für das Polynom verwendet, dessen Koeffizienten dann im Sinne der kleinsten Abstandsquadrate für diese Stützstellen bestimmt werden. Das Polynom wird anschließend dazu verwendet, den Verlauf der L_I -Messung über den Cycle Slip hinaus zu extrapolieren. Dabei sei δ die Differenz zwischen dem ersten L_I -Wert nach dem Cycle Slip (Zeitpunkt k) und dem entsprechenden extrapolierten Wert L_I^{ext} :

$$\delta = L_I(k) - L_I^{ext}(k) \quad (5.15)$$

Um einzuschätzen, in welchem Maße die L_I -Messungen nach dem Cycle Slip dem extrapolierten Verlauf folgen, wird zwischen den ersten 3 um δ verminderten L_I -Werten (30 Sekunden bei 0,1 Hz) nach dem Cycle Slip und den entsprechenden extrapolierten Werten ein RMSE (σ_{ext}) berechnet:

$$\sigma_{ext} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=k}^{k+2} (L_I(i) - \delta - L_I^{ext}(i))^2} \quad (5.16)$$

Um den Grad n des Polynoms zu bestimmen, welches dem Verlauf der Messungen nach dem Cycle Slip am nächsten kommt, wird diese Prozedur mit Polynomen aufsteigenden Grades wiederholt ($n \leq 4$) und das Polynom mit dem geringsten σ_{ext} bestimmt. Durch dieses Verfahren wird zumeist ein Polynom 2. Grades gewählt. Übersteigt das kleinste σ_{ext} dabei einen bestimmten Schwellwert (für die Prozessierung der CHAMP-Daten wurden 0,25 m verwendet), so wird der Cycle Slip als nicht behebbar angesehen. In der weiteren Prozessierung (siehe Kapitel 5.4.1) werden die Teilbögen beiderseits dieses Cycle Slips dann separat behandelt.

Ist der Polynomfit im Rahmen der genannten Kriterien jedoch erfolgreich, dann lässt sich ΔN_2 (siehe (5.6)) aus δ für den besten Polynomfit (geringstes σ_{ext}) unter Berücksichtigung von (5.14) und (5.15) bestimmen:

$$\Delta N_2 = (\delta - \lambda_1 \Delta N_\delta) / (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (5.17)$$

Dabei bezeichnet $\Delta N_\delta \equiv N'_\delta - N_\delta = \Delta N_1 - \Delta N_2$ die Änderung des Wide-Lane-Phasenmehrfachdeutigkeitsparameters (5.11) an der Stelle des Cycle Slips. Zur Bestimmung von ΔN_δ werden, wie von *Blewitt* (1990) empfohlen, die laufenden Mittelwerte $\langle N_\delta \rangle$ (siehe (5.12)) mit den jeweils geringsten Werten von $\sigma_n / \sqrt{(n-1)}$ beiderseits des Cycle Slips verwendet.

Da ΔN_δ nur ganzzahlig sein kann, wird der ermittelte Wert zur nächsten ganzen Zahl auf- bzw. abgerundet. Gleiches gilt auch für die Werte ΔN_2 und $\Delta N_1 = \Delta N_\delta + \Delta N_2$, die dann ausgehend von (5.17) bestimmt werden können. Die Änderungen der Phasenmehrfachdeutigkeitsparameter können nun zur Korrektur der Cycle Slips dienen, indem sie auf alle dem Cycle Slip folgenden Trägerphasenmessungen angewendet werden. Die Cycle Slip korrigierten Trägerphasen L_{C1} und L_{C2} berechnen sich dann zu:

$$L_{C1} = L_1 - \lambda_1 \Delta N_1 \text{ und } L_{C2} = L_2 - \lambda_2 \Delta N_2 \quad (5.18)$$

Es bleibt anzumerken, dass Cycle Slips für den recht unwahrscheinlichen Fall von $\Delta N_8 = 0$ bzw. $\Delta N_2 = \Delta N_1$ mit dem hier vorgestellten Verfahren nicht detektierbar sind. Die entsprechenden Bögen würden dann allerdings während der weiteren Vorprozessierung (siehe Kapitel 5.4.1) erkannt und von den folgenden Prozessierungsschritten (siehe Abb. 5.2) ausgeschlossen.

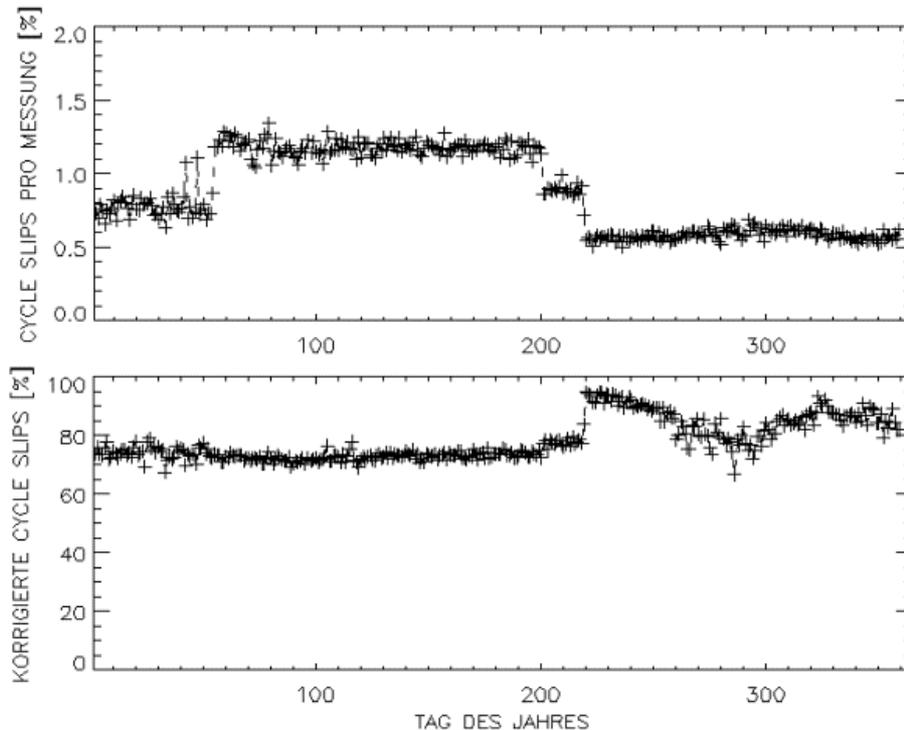


Abb. 5.5: Cycle-Slip-Prozessierung der CHAMP-GPS-Daten des Jahres 2001: **oben:** Prozentualer Anteil der detektierten Cycle Slips an der Gesamtzahl der Messungen. **unten:** Prozentualer Anteil der korrigierten Cycle Slips an der Gesamtzahl der Cycle Slips.

Abb. 5.5 vermittelt abschließend einige quantitative Informationen über die praktische Anwendung des beschriebenen Verfahrens zur Detektierung und Korrektur von Cycle Slips auf die CHAMP-GPS-Daten des Jahres 2001. Während dieses Zeitraumes liegt die relative Anzahl der detektierten Cycle Slips bezogen auf die Gesamtzahl der Messungen zwischen 0,5 und 1,3 %. Die drei in Abb. 5.5 (oben) deutlich erkennbaren stufenförmigen Änderungen des relativen Cycle Slip Anteils korrespondieren jeweils mit Änderungen (Verbesserungen) der Software bzw. der Konfiguration des GPS-Empfängers. Fehler in der Empfängersoftware sind, wie bereits erwähnt, eine mögliche Ursache für das Auftreten von Cycle Slips. Wie Abb. 5.5 (unten) zeigt, liegt der Anteil der korrigierten Cycle Slips für die Daten des Jahres 2001 etwa zwischen 70 und 90 %, wobei die deutliche sprunghafte Änderung nach dem Tag 220 wiederum mit einer Verbesserung der GPS-Empfängersoftware korrespondiert.

5.4 Kalibrierung der relativen TEC-Messungen

Wie bereits im Kapitel 4.3 ausgeführt wurde, können Absolutwerte des TEC aus den GPS-Messungen gewonnen werden, indem man die Informationen aus den differentiellen Code- und Trägerphasenmessungen in geeigneter Weise kombiniert und anschließend eine Abschätzung der instrumentellen Biases zur endgültigen Kalibrierung der TEC-Messungen durchführt. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten und angewendeten Verfahren zur Durchführung dieser beiden Kalibrierungsschritte sollen im Folgenden beschrieben und diskutiert werden.

5.4.1 Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten

In Kapitel 4.3 wurde gezeigt, dass sowohl die differentiellen Codephasen P_I als auch die differentiellen Trägerphasen L_I Informationen über die integrale Elektronendichte entlang des Signalweges (TEC) enthalten, wobei P_I frei von Phasenmehrdeutigkeiten ist. Diese Eigenschaft kann dazu verwendet werden, die Phasenmehrdeutigkeiten in den L_I -Messungen zu lösen, welche qualitativ höherwertig sind (deutlich geringeres Rauschen, siehe Abb. 5.6) und daher im weiteren zur Bestimmung von TEC verwendet werden sollen. Wir betrachten zunächst die Differenz zwischen (4.8) und (4.9):

$$P_I - L_I = -DCB + \Delta\varepsilon_p - C_{off} \quad (5.19)$$

wobei $DCB = dcb_S + dcb_R$ die Summe der differentiellen Codebiases darstellt und

$C_{off} = dtb_S + dtb_R + N_1\lambda_1 - N_2\lambda_2$ die Summe der differentiellen Phasenmehrdeutigkeiten und Trägerphasenbiases repräsentiert.

Die differentiellen Biases der Code- bzw. Trägerphasen verändern sich im Allgemeinen nur langsam und werden üblicherweise in der Größenordnung eines Tages als konstant angesehen (z.B. *Sardon, 1994*). Diese Annahme ist bei der Betrachtung einzelner Bögen (aufeinanderfolgende Messungen während der Passage eines GPS-Satelliten) um so mehr gerechtfertigt, da diese eine zeitlich Größenordnung von nur etwa 30 Minuten bei satellitengebundenen Beobachtungen aus dem erdnahen Orbit (z.B. an Bord von CHAMP) bis zu einigen Stunden bei Bodenstationsbeobachtungen aufweisen (siehe Abb. 5.6). Ist der betrachtete Bogen weiterhin frei von Cycle Slips, bzw. konnten diese korrigiert werden (siehe Kapitel 5.3), so ist auch der Term C_{off} für den entsprechenden Bogen als konstant anzusehen. Wie bereits in Kapitel 4.3 ausgeführt, ist der differentielle Restfehler der Codephasenmessungen $\Delta\varepsilon_p$ von nicht zu vernachlässigender Größe, kann allerdings über einen gewissen Zeitraum der Länge T betrachtet als Rauschen aufgefasst werden. Bildet man nun für ein Intervall der Mindestlänge T das Mittel über (5.19), so ist das zeitliche Mittel des Rauschterms $\Delta\varepsilon_p$ vernachlässigbar klein und es folgt unter Annahme konstanter DCB und C_{off} :

$$\langle P_I - L_I \rangle_T = -\langle DCB \rangle_T + \langle \Delta\varepsilon_p \rangle_T - \langle C_{off} \rangle_T = -DCB - C_{off} \quad (5.20)$$

Durch Addition von (5.20) und (4.9) erhält man schließlich eine Formulierung zur Berechnung des TEC, welche die Vorzüge von L_I und P_I miteinander verbindet, d.h. gute Signalqualität mit geringem Rauschen bei gleichzeitiger Freiheit von Phasenmehrdeutigkeiten (Abb. 5.6):

$$L_I + \langle P_I - L_I \rangle_T = K \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 f_2^2} \text{TEC} - DCB \quad (5.21)$$

bzw.

$$\text{TEC} = (L_I + \langle P_I - L_I \rangle_T + \text{DCB}) \frac{f_1^2 f_2^2}{K(f_1^2 - f_2^2)} \quad (5.22)$$

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet kann die beschriebene Kombination von L_I und P_I als ein Heben der fortlaufenden differentiellen Trägerphasenmessungen L_I in die entsprechenden differentiellen Codephasenmessungen P_I im Sinne der kleinsten Abstandsquadrate bezeichnet werden. Dabei nimmt die Summe der Abstandsquadrate zwischen P_I und $L_I + C$ genau dann ein Minimum an, wenn $C = \langle P_I - L_I \rangle_T = \langle P_I \rangle_T - \langle L_I \rangle_T$, d.h. wenn L_I um die Differenz der Mittelwerte von P_I und L_I gehoben wird.

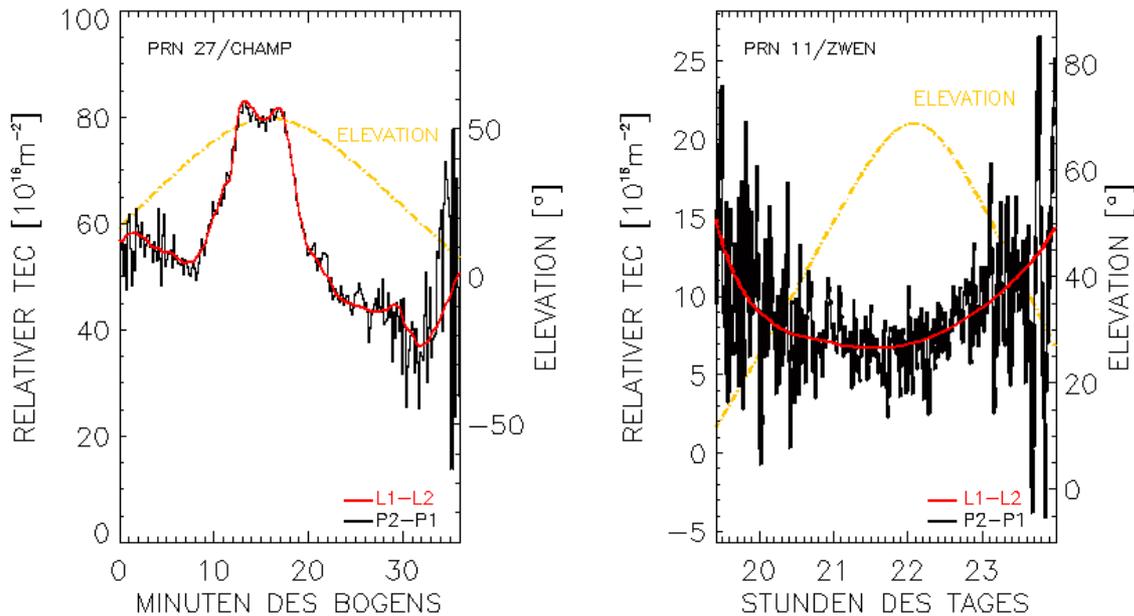


Abb. 5.6: Typische Verläufe differentieller Träger- und Codephasenmessungen: **links:** an Bord von CHAMP. **rechts:** GPS-Bodenstation Zwenigorod.

Abb. 5.6 veranschaulicht die Kombination von P_I und L_I zur Bestimmung des relativen TEC anhand typischer Messungen dieser Größen sowohl an Bord von CHAMP als auch von einer GPS-Bodenstation. Bei beiden Messungen wird das durch Mehrwegeeffekte bedingte Rauschen von P_I sehr deutlich. Im Allgemeinen tritt das Minimum dieses Rauschens im Bereich der höchsten Elevationen des GPS-Satelliten gegenüber der Antenne auf, da dann die Quellen der Mehrwegeausbreitung (Reflexionsmedien) wie z.B. Gebäude, Bäume oder kleinskalige troposphärische Strukturen die geringsten Einflüsse ausüben. Bei satellitengebundenen GPS-Messungen wird die Mehrwegeausbreitung im Wesentlichen durch Reflexionen am empfängerseitigen Satellitenkörper ausgelöst, so dass die stärksten Mehrwegeeffekte auch hier bei geringen Elevationswinkeln auftreten.

Anhand der Abb. 5.6 wird auch sehr deutlich, dass der zu verwendende minimale Mittelungszeitraum T bei der Anwendung von (5.20) bis (5.22) auf Bodenstationsdaten deutlich länger zu wählen ist als bei deren Anwendung auf GPS-Messungen an Bord eines niedrig fliegenden Satelliten. Da sich die für Änderungen der Mehrwegeeffekte maßgebliche Beobachtungsgeometrie hier durch die rasante Bewegung des Empfängers deutlich schneller verändert als bei Bodenstationsbeobachtungen, kann der differentielle Restfehler der Codephasenmessungen $\Delta \varepsilon_p$ bei den Satellitenmessungen innerhalb eines deutlich kürzeren Zeitintervalls als Rauschterm betrachtet werden.

Bei der Prozessierung von Bodenstationsdaten verwendet man für T meist die Dauer des gesamten Bogens. Dabei ist es üblich, einen Grenzwinkel α für die Elevation festzulegen

(gebräuchlich sind 10° - 20°), unterhalb dessen die GPS-Messungen wegen der dort zu erwartenden maximalen Mehrwegeeffekte von der Prozessierung ausgeschlossen werden. Ein probates Mittel zur Unterbindung des Einflusses starker P_I -Schwankungen auf die Mittelwertbildung $\langle P_I - L_I \rangle_T$ ist auch die Bestimmung des Medianwertes an Stelle des arithmetischen Mittels. Bei der Medianwertbildung werden die zu mittellenden Werte in eine aufsteigende Reihenfolge gebracht und mit einem durchlaufenden Index versehen. Handelt es sich dabei um eine ungerade Anzahl Z von Elementen, wird der Wert mit dem Index $1+(Z-1)/2$ als Medianwert betrachtet, bei einer geraden Anzahl gilt das arithmetische Mittel der Werte mit den Indizes $Z/2$ und $1+Z/2$ als Medianwert.

Wenn die zu prozessierenden GPS-Daten Informationen über das Signal-zu-Rausch-Verhältnis der einzelnen GPS-Messungen enthalten, können diese Angaben berücksichtigt werden, um schwache (bzw. stark verrauschte) Messungen grundsätzlich von der Mittelwertbildung $\langle P_I - L_I \rangle_T$ auszuschließen.

Bei der Behandlung satellitengebundener GPS-Messungen kann prinzipiell auf dieselbe Weise verfahren werden, wie für Bodenstationsmessungen beschrieben. Wenn analog der Grenzwinkels α zur Datenselektion verwendet werden soll, ist allerdings zu beachten, dass insbesondere bei häufig wechselnder Fluglage des Satelliten permanent Daten, welche die Fluglage beschreiben, zur Bestimmung des Elevationswinkels erforderlich sind. Man benötigt also einen zusätzlichen Datentyp, der unter Umständen nur unzureichend und mit zeitlichen Verzögerungen verfügbar ist. Andererseits bieten Satellitenmessungen die Möglichkeit, T deutlich kürzer zu wählen und enthalten durch das Fehlen entsprechender Reflexionsquellen auch längere Abschnitte, in denen P_I nur geringfügig durch Mehrwegeeffekte beeinflusst wird. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren zur Bestimmung von $\langle P_I - L_I \rangle_T$ des gesamten Bogens und damit zur Lösung der entsprechenden Phasenmehrdeutigkeiten entwickelt, welches diese speziellen Eigenschaften der Satellitenmessungen nutzt, nicht auf die Kenntnis des Elevationswinkels des GPS-Satelliten gegenüber der Antenne angewiesen ist und zugleich die Möglichkeit einer zusätzlichen und abschließenden Qualitätskontrolle während der Datenvorprozessierung bietet. Dieses Verfahren wird im Folgenden beschrieben.

Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten mit dem Intervall-Verfahren

Da die differentiellen Codephasenmessungen P_I an Bord von CHAMP im Normalfall gewisse Abschnitte enthalten, die nur geringfügig von Mehrwegeeffekten beeinflusst werden (siehe Abb. 5.6), liegt der Gedanke nahe, genau diese Bereiche des jeweiligen Bogens zur Bestimmung des Mittelwertes $\langle P_I - L_I \rangle_T$ zu verwenden.

Durch intervallweisen Vergleich von P_I mit den rauscharmen L_I -Messungen lassen sich solche Abschnitte relativ leicht identifizieren. Eine geeignete Länge für das benötigte Vergleichsintervall kann allerdings nur im Umgang mit den Daten bestimmt werden. Grundsätzlich sollte das Intervall dabei nicht größer sein als die übliche Länge der rauscharmen Abschnitte von P_I , muss jedoch eine Länge aufweisen, bei der $\Delta \varepsilon_p$ bereits als Rauschen betrachtet werden kann. Der bereits erwähnte schnelle Wechsel der Mehrwegeeffekte bei satellitengebundenen GPS-Messungen bietet eine gute Voraussetzung für die Erfüllbarkeit dieser Forderung. Aufgrund von Erfahrungswerten beim Umgang mit den CHAMP-Daten wurde die Länge des Vergleichsintervalls auf 4 Minuten festgelegt. Damit ist auch die zeitliche Mindestlänge definiert, welche ein Bogen zur Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten mit diesem Verfahren aufweisen muss. Wird diese Länge unterschritten, ist der entsprechende Bogen von der weiteren Prozessierung auszuschließen.

Zum Vergleich von L_I und P_I innerhalb des Intervalls der Länge TI wird σ_{LP} als RMSE zwischen L_I und P_I bestimmt, wobei der Abstand zwischen Anfangsindex k und Endindex $k+n$ durch TI und die Messfrequenz (0,1 Hz bei CHAMP) festgelegt wird. Die differentiellen Trägerphasen sind dabei durch Addition von $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ intervallweise in die differentiellen Codephasen zu heben:

$$\sigma_{LP} = \sqrt{\frac{1}{n+1} \sum_{i=k}^{k+n} (L_I(i) + \langle P_I - L_I \rangle_{TI} - P_I(i))^2} \quad (5.23)$$

wobei $\langle P_I - L_I \rangle_{TI} = 1/(n+1) \sum_{i=k}^{k+n} (P_I(i) - L_I(i))$ als arithmetisches Mittel bestimmt wird.

Der so berechnete Wert σ_{LP} ist ein Maß für das Rauschen von P_I gegenüber L_I innerhalb des betrachteten Intervalls. Diese Größe kann als Entscheidungskriterium über die Nutzung der entsprechenden Messungen zur abschließenden Mittelwertbildung $\langle P_I - L_I \rangle_T$ für den gesamten Bogen dienen, indem ein geeigneter Grenzwert für σ_{LP} festgelegt wird, oberhalb dessen die Messungen des betrachteten Intervalls von der abschließenden Mittelwertbildung ausgeschlossen bleiben. Eine sinnvolle Größe für diesen Grenzwert kann wiederum nur im Umgang mit den Daten ermittelt werden und hängt von der allgemeinen Datenqualität ab, die z.B. durch den verwendeten Empfängertypen aber auch durch die Gestalt des empfängerseitigen Satelliten (Quelle von Mehrwegeeffekten) bestimmt wird. Der gewählte Grenzwert sollte grundsätzlich eine sichere Unterscheidung zwischen „üblichem“ Codephasenrauschen und deutlichen Mehrwegeeffekten gewährleisten und ist gleichzeitig als Genauigkeitsmaß bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten mit dem Intervall-Verfahren anzusehen. Bei der Prozessierung der CHAMP-Daten hat sich ein Grenzwert von 0,35 m in diesem Sinne als geeignet erwiesen.

Die Größe σ_{LP} wird nun fortlaufend entlang des gesamten Bogens bestimmt, indem der Index k in Gleichung (5.23) schrittweise um eins erhöht wird bis $k+n$ den Index der letzten Messung des Bogens erreicht hat. Die Werte von σ_{LP} werden jeweils mit dem definierten Grenzwert verglichen. Bei Unterschreitung des Grenzwertes werden alle Messungen des betrachteten Intervalls zur abschließenden Mittelwertbildung $\langle P_I - L_I \rangle_T$ als verwendbar eingestuft, bei einer Überschreitung erfolgt diese Einstufung entsprechend nicht. Die Berechnung von $\langle P_I - L_I \rangle_T$ für den gesamten Bogen erfolgt dann nur mit den entsprechend eingestuften Messungen, wobei hier das arithmetische Mittel gebildet wird.

Anhand der ermittelten Werte von $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ entlang des Bogens ist schließlich auch eine letzte Prüfung der GPS-Datenqualität möglich. Der Vergleich des maximalen und des minimalen Wertes von $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ für den betrachteten Bogen bietet eine Gelegenheit zur Abschätzung der Genauigkeit bei der Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten. Weiterhin können Cycle Slips, die mit dem in Kapitel 5.3 beschriebenen Verfahren nicht detektierbar waren, festgestellt werden, da sich $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ vor und nach einem Cycle Slip erheblich voneinander unterscheiden.

Es empfiehlt sich, einen Grenzwert für die Differenz zwischen maximalem und minimalem $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ festzulegen, oberhalb dessen die mögliche Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten als unzureichend eingestuft und der entsprechende Bogen von der weiteren Prozessierung ausgeschlossen wird. Ursachen dafür können zu starkes Rauschen der differentiellen Codephasen P_I oder das Auftreten eines Cycle Slips sein. Bei der Prozessierung der CHAMP-Daten wurde hier ein Grenzwert von 6 TECU verwendet. Die Umrechnung der Größe $\langle P_I - L_I \rangle_{TI}$ von Meter in TECU ist aus Gleichung (5.22) ersichtlich. Die Wahl dieses Grenzwertes basiert wiederum auf Erfahrungswerten im Umgang mit den CHAMP-Daten und soll es ermöglichen, üblicherweise auftretende

Differenzen zwischen maximalem und minimalem $\langle P_I - L_I \rangle_T$ sicher von solchen bei stark verrauschten oder mit Cycle Slips behafteten Messungen zu unterscheiden.

Das hier beschriebene Intervall-Verfahren ist generell zur Vorprozessierung (Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten) der im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten CHAMP-GPS-Messungen verwendet worden und hat sich dabei als zuverlässig und für eine automatische Datenprozessierung geeignet erwiesen. Abb. 5.7 vermittelt quantitative Informationen zur Vorprozessierung der CHAMP-GPS-Daten des Jahres 2001. In den meisten Fällen innerhalb dieses Zeitraumes liegen pro Tag 60000 bis 65000 GPS-Messungen vor. Der Anteil der Messungen, die im Sinne der beschriebenen Verfahren zur Bestimmung der Phasenmehrdeutigkeiten und Beseitigung von fehlerhaften Einzelmessungen und Cycle Slips erfolgreich vorprozessiert wurden und zur weiteren Auswertung (siehe Abb. 5.2) zur Verfügung stehen, liegt für die Daten des Jahres 2001 etwa zwischen 60 und 80 %.

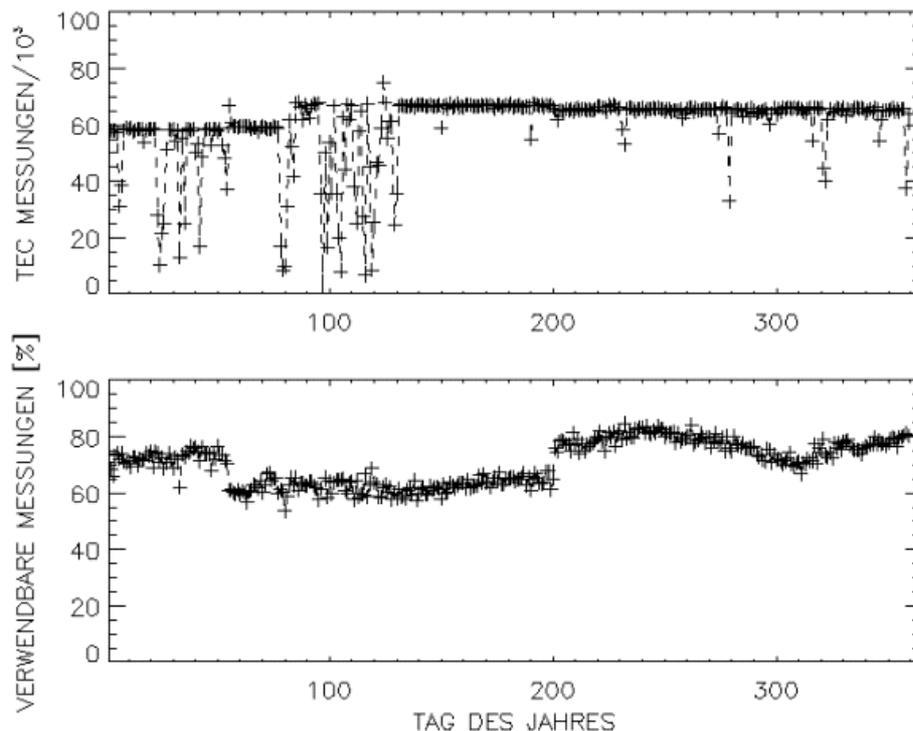


Abb. 5.7: Vorprozessierung der CHAMP-GPS-Daten des Jahres 2001: **oben:** Absolute Anzahl der pro Tag verfügbaren GPS- bzw. TEC-Messungen. **unten:** Prozentualer Anteil der erfolgreich vorprozessierten GPS-Messungen an deren Gesamtzahl.

5.4.2 Bestimmung der instrumentellen Biases

Nach Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten durch geeignete Bestimmung des Terms $\langle P_I - L_I \rangle_T$ in Gleichung (5.22) verbleibt die Summe der differentiellen Codebiases von GPS-Satellit und Empfänger $DCB = dcb_S + dcb_R$ als letzte Unbekannte bei der Bestimmung des absoluten TEC. Wie bereits in Kapitel 5.1.3 erwähnt, werden die differentiellen Codebiases der GPS-Satelliten auf stabile und zuverlässige Weise im Zusammenhang mit der routinemäßigen Prozessierung von GPS-Bodenstationsdaten zur Ableitung regionaler oder globaler $vTEC$ -Karten von verschiedenen GPS-Prozessierungszentren wie z.B. CODE oder JPL bestimmt. Eine vergleichbare Prozessierung der GPS-Biases erfolgt auch am DLR IKN Neustrelitz im Rahmen einer routinemäßigen (täglichen) Erstellung von $vTEC$ -Karten für den europäischen Raum. Die GPS-Biases wurden daher im Rahmen dieser Arbeit als bereits bekannte Größen vorausgesetzt. Die Bestimmung der instrumentellen

Biases sowohl der GPS-Satelliten als auch der involvierten GPS-Empfänger aus GPS-Beobachtungen eines Netzwerks von Bodenstationen wird z.B. von *Sardon et al.* (1994) oder *Sardon und Zarraoa* (1997) detailliert beschrieben und soll an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt werden.

Zur Bestimmung des differentiellen Codebias eines im Orbit befindlichen GPS-Empfängers existieren bislang keine etablierten Verfahren wie dies für erdgebundene Empfänger der Fall ist. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein eigenes Verfahren zur Bestimmung des Biases des an Bord von CHAMP befindlichen GPS-Empfängers entwickelt. Dieses soll nun vorgestellt werden.

Betrachten wir dazu zunächst Gleichung (5.22) in abgewandelter Form:

$$\text{TEC} = \text{TEC}_{rel} + B_S + B_R \quad (5.24)$$

wobei

$$\text{TEC}_{rel} \equiv (L_I + \langle P_I - L_I \rangle_T) \frac{f_1^2 f_2^2}{K(f_1^2 - f_2^2)}$$

den relativen TEC darstellt, der sich aus den mehrdeutigkeitsbereinigten differentiellen Trägerphasemessungen ergibt und

$$B_S + B_R \equiv (dcb_S + dcb_R) \frac{f_1^2 f_2^2}{K(f_1^2 - f_2^2)}$$

die Summe der differentiellen Codebiases des empfangenen GPS-Satelliten und des Empfängers ausgedrückt in der Einheit des TEC [m⁻²] repräsentiert.

Mittelt man Gleichung (5.24) über n Einzelmessungen (TEC_{rel}) verschiedener GPS-Satelliten innerhalb eines gewissen Zeitraumes t , so folgt unter Annahme eines konstanten Empfängerbiases innerhalb dieses Zeitraumes:

$$B_R = \langle \text{TEC} - \text{TEC}_{rel} - B_S \rangle_{n,t} = \langle \text{TEC} \rangle_{n,t} - \langle \text{TEC}_{rel} + B_S \rangle_{n,t} \quad (5.25)$$

Die Annahme der Konstanz des Empfängerbiases über einen längeren Zeitraum hinweg (Größenordnung von Tagen) ist gerechtfertigt, da die Temperatur an Bord des CHAMP-Satelliten stabil gehalten wird und die Schwankungen von Empfängerbiases im Wesentlichen auf Temperaturschwankungen der Empfängerhardware zurückzuführen sind. Nimmt man weiterhin an, dass ein Modell der Ionosphäre und Plasmasphäre im Mittel über den Zeitraum t und verschiedene geographische Regionen den tatsächlichen Ionisationszustand der Ionosphäre/Plasmasphäre widerspiegelt, so lässt sich das Mittel über die tatsächlichen TEC-Werte entlang der verschiedenen Strahlenwege in Gleichung (5.25) durch das Mittel über die modellierten TEC-Werte TEC_{mo} entlang dieser Strahlenwege ersetzen. Als Modell wurde in diesem Zusammenhang das PIM (siehe Kapitel 2.9.3) verwendet. Da die Strahlengeometrie aufgrund der Orbitinformationen bekannt ist, kann TEC_{mo} für die verschiedenen Strahlenwege leicht durch Integration der vom Modell gelieferten Elektronendichtewerte entlang der Strahlenwege bestimmt werden. Unter der Annahme

$$\langle \text{TEC} \rangle_{n,t} \approx \langle \text{TEC}_{mo} \rangle_{n,t} \quad (5.26)$$

lässt sich also der Empfängerbias B_R folgendermaßen abschätzen:

$$B_R \approx \langle \text{TEC}_{mo} - \text{TEC}_{rel} - B_S \rangle_{n,t} \quad (5.27)$$

Damit die Bedingung (5.26) möglichst gut erfüllt ist, werden nicht alle TEC_{rel} -Messungen, die in den Zeitraum t fallen zur Bestimmung von B_R verwendet, sondern es wird eine Auswahl getroffen, die von vornherein kleine TEC-Werte und damit geringe absolute Differenzen zwischen TEC und TEC_{mo} erwarten lässt. Von einer geringen Ionisation und damit vergleichsweise kleinen TEC-Werten kann im Allgemeinen auf der Nachtseite der Erde und hier insbesondere im Bereich der mittleren und hohen Breiten ausgegangen werden (siehe Kapitel 2.3.1). Weiterhin hängt die Höhe des strahlenwegbezogenen TEC naturgemäß von der Länge des zurückgelegten Weges durch die Ionosphäre, d.h. von der Elevation des Strahls gegenüber dem CHAMP-Satelliten ab. Die Elevation lässt sich leicht bestimmen, da der Positionsvektor von CHAMP sowie der Richtungsvektor des Strahls bekannt sind. Die Auswahl der zur Abschätzung von B_R verwendeten TEC_{rel} -Messungen erfolgt also anhand dreier Kriterien: Lokalzeitsektor und geographische Breite des CHAMP-Satelliten zum Zeitpunkt der Messung sowie Elevation des Strahls gegenüber der CHAMP-Flugebene (bildet einen rechten Winkel mit dem CHAMP-Positionsvektor). Es werden dabei alle TEC_{rel} -Messungen verwendet, die nördlich von 50° N bzw. südlich von 50° S innerhalb eines Lokalzeitbereiches von 19:00 bis 5:00 aufgenommen wurden und eine Elevation von mindestens 50° gegenüber der Flugebene aufweisen. Die Festlegung dieser Grenzwerte basiert auf Erfahrungen im Umgang mit den Daten und stellt einen Kompromiss zwischen dem Wunsch nach möglichst geringen TEC-Werten einerseits und einer möglichst hohen Anzahl von Messungen zur Mittelwertbildung andererseits dar.

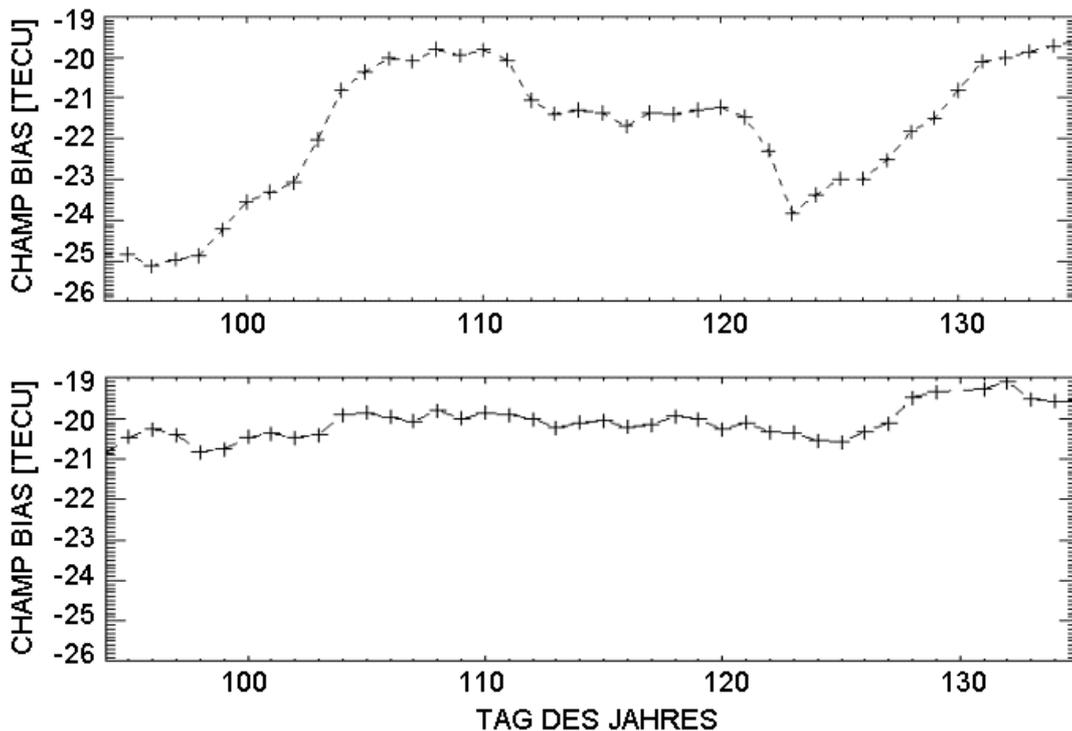


Abb. 5.8: Differentieller Codebias des CHAMP-GPS-Empfängers für die Tage 94 bis 135 des Jahres 2001, **oben:** ohne Korrektur anhand negativer TEC-Werte. **unten:** mit entsprechender Korrektur.

Es ist denkbar, dass die Annahme (5.26) insbesondere während des Auftretens großräumiger ionosphärischer Irregularitäten (z.B. ionosphärischer Stürme) verletzt werden kann und der ermittelte Empfängerbias dann entsprechenden Schwankungen unterliegen würde. Um den Einfluss solcher Störgrößen zu reduzieren, wird ein Mittelungszeitraum t von fünf Tagen verwendet. Da die GPS-Biases als Tageswerte vorliegen, wird auch der CHAMP-Empfängerbias tagesbezogen bestimmt, stellt dabei aber ein gleitendes Mittel über den Bezugstag und die jeweils vier vorhergehenden Tage dar. Weiterhin können

kleinräumige ionosphärische Irregularitäten dazu führen, dass TEC und TEC_{mo} in Einzelfällen erheblich voneinander abweichen. Um den Einfluss solcher Ausreißer auf den ermittelten Empfängerbias zu reduzieren, wird B_R in Gleichung (5.27) nicht als arithmetisches Mittel sondern als Medianwert (siehe Kapitel 5.4.1) bestimmt.

Bei der praktischen Anwendung des nach dem beschriebenen Verfahren bestimmten Empfängerbiases zur Kalibrierung der TEC_{rel} -Messungen resultierten allerdings zeitweise gehäuft negative TEC-Werte (insbesondere bei Messungen in den naturgemäß schwächer ionisierten Polarbereichen). Diese sind natürlich unphysikalisch und daher von der weiteren Datenprozessierung (Assimilation) auszuschließen. Treten die negativen TEC-Werte nur vereinzelt auf, ist dies nicht zwangsläufig einem fehlerhaft bestimmten Empfängerbias zuzuschreiben sondern kann auch auf Ungenauigkeiten einzelner GPS-Biases oder auf Probleme bei der Behebung der Phasenmehrdeutigkeiten zurückzuführen sein. Das gehäufte Auftreten negativer TEC-Werte bei den Messungen verschiedener GPS-Satelliten ist allerdings als sicheres Indiz für einen fehlerhaft bestimmten Empfängerbias zu werten. Daher wird beim Auftreten negativer TEC-Werte bei den Messungen von mehr als 2 GPS-Satelliten eine Korrektur des Empfängerbiases B_R um den Medianwert der festgestellten negativen TEC-Werte durchgeführt. Natürlich kann diese Maßnahme den jeweiligen Wert des Empfängerbiases nicht vollständig korrigieren. Sie stellt aber in jedem Fall eine Verbesserung dar, die das Auftreten der negativen TEC-Werte in der Praxis stark reduziert und, wie Abb. 5.8 zeigt, zu einer deutlichen Verminderung der zeitlichen Schwankungen des resultierenden Empfängerbiases führt. Es ist anzumerken, dass die beschriebene Korrekturmöglichkeit einem glücklichen Umstand zu verdanken ist: Das verwendete Modell unterschätzt offenbar des öfteren den tatsächlichen mittleren Ionisationszustand der Ionosphäre, was sich in einem zu kleinen Empfängerbias niederschlägt, der mit Blick auf Gleichung (5.24) dann zu den negativen TEC-Werten führt. Würde das verwendete Modell den Ionisationszustand in ähnlicher Weise überschätzen, wäre eine Korrektur anhand negativer TEC-Werte nicht möglich.

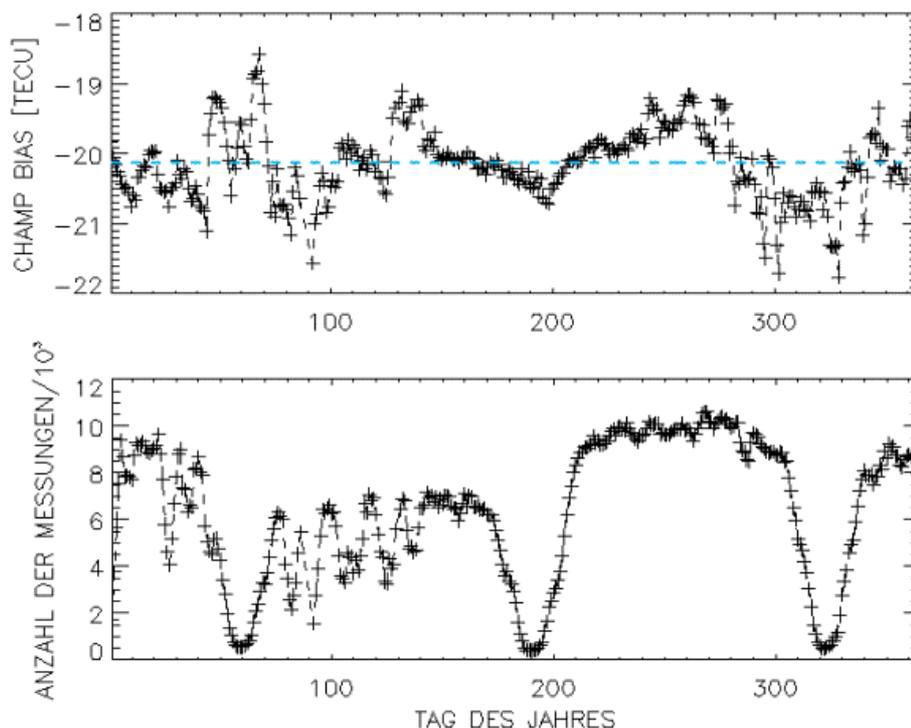


Abb. 5.9: *oben:* Differentieller Codebias des CHAMP-GPS-Empfängers für das Jahr 2001. *unten:* Anzahl der jeweils zur Biasbestimmung (fünftägiges gleitendes Mittel) verwendeten GPS-Messungen.

Wie Abb. 5.9 zeigt, ist der mit dem beschriebenen Verfahren abgeschätzte Bias des CHAMP-GPS-Empfängers über den gesamten Zeitraum des Jahres 2001 hinweg recht stabil. Er beträgt für diesen Zeitraum im Mittel $-20,13$ TECU bei einem RMSE von $0,51$ TECU. Weiterhin zeigt Abb. 5.9 die Anzahl der unter Beachtung der genannten Auswahlkriterien zur Biasbestimmung verfügbaren TEC_{rel} -Messungen jeweils fünf aufeinanderfolgender Tage. Besonders auffällig sind hier die im Abstand von etwa 130 Tagen auftretenden stark ausgeprägten Minima, bei denen jeweils nur einige hundert Messungen zur Biasbestimmung verfügbar sind. Offenbar ist aber selbst mit dieser vergleichsweise geringen Anzahl von Messungen eine sichere Biasbestimmung möglich. Die Ursache für das Auftreten dieser Minima ist die langsame aber kontinuierliche Verschiebung der lokalzeitlichen Lage der CHAMP-Orbitebene. Die Minima treten aufgrund der gewählten Lokalzeitbeschränkungen immer dann auf, wenn die Orbitebene (polare Bahn) lokalzeitlich durch den Morgen- und Abendsektor verläuft, während die Maxima bei der Kombination von Tag- und Nachtsektoren auftreten. Die unterschiedlichen Niveaus der vier in Abb. 5.9 enthaltenen Maxima sind im Wesentlichen auf unterschiedliche Konfigurationen des GPS-Empfängers zurückzuführen.

Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die GPS-Biases durch die Auswertung von GPS-Bodenstationsdaten nicht absolut bestimmt werden können, sondern sich stets auf einen Referenzwert beziehen. Der allgemein übliche und auch im IONEX-Format (siehe Kapitel 5.1.3) verwendete Referenzwert ist dabei das stabile (jedoch ebenfalls unbekannte) arithmetische Mittel aller absoluten GPS-Biases. Dabei gilt für die verschiedenen GPS-Biases die Relation:

$$B_S = B_{Sabs} - \langle B_{Sabs} \rangle_i \quad (5.28)$$

wobei B_{Sabs} hier den jeweiligen Absolutwert des GPS-Biases darstellt und $\langle B_{Sabs} \rangle_i$ das arithmetische Mittel über die absoluten Biases der i existierenden GPS-Satelliten symbolisiert. Der mit dem beschriebenen Verfahren ermittelte Empfängerbias ist folglich auch kein Absolutwert sondern ergibt sich mit Blick auf Gleichung (5.27) zu:

$$B_R = B_{Rabs} + \langle B_{Sabs} \rangle_i \quad (5.29)$$

wobei B_{Rabs} hier den absoluten Empfängerbias darstellt. Zur Kalibrierung der TEC_{rel} -Messungen (siehe Gleichung (5.24)) werden B_S und B_R allerdings addiert, so dass der unbekannte Mittelwert der GPS-Biases entfällt und die Kenntnis der absoluten Biases von GPS-Satelliten und Empfänger zur Kalibrierung nicht erforderlich ist.