

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Bestimmung globaler dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen im Bereich der oberen Ionosphäre und der Plasmasphäre, basierend auf satellitengestützten GPS-Messungen an Bord des deutschen Kleinsatelliten CHAMP. Die in diesem Zusammenhang entwickelten, rechen-technisch umgesetzten und getesteten Verfahren, Methoden und Algorithmen bilden den zentralen Teil der Arbeit und werden ausführlich dargelegt. Erfahrungen aus deren konkreter Anwendung auf die CHAMP-GPS-Daten werden vermittelt. Die unter Verwendung der beschriebenen Verfahren rekonstruierte Elektronendichteverteilungen werden präsentiert und diskutiert sowie erste Ergebnisse der Validierung dieser Resultate mit unabhängigen Elektronendichtemessungen vorgestellt.

Bisherige Verfahren zur Fernerkundung der ionosphärischen Elektronendichteverteilung, welche auf der Beobachtung transionosphärischer Signale basieren, sind hauptsächlich tomographischer Natur und nutzen im Wesentlichen Bodenstationsmessungen. Weiterhin ermöglicht die Auswertung bodengebundener GPS-Messungen die Erstellung globaler und regionaler Karten des vertikalen TEC. Die Analyse satellitengebundener GPS-Okkultationsmessungen erlaubt die Ableitung vertikaler ionosphärischer Elektronendichteprofile. Eine Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung im Bereich der oberen Ionosphäre und insbesondere der Plasmasphäre im globalen Maßstab war unter Verwendung transionosphärischer Signale bisher jedoch nicht möglich.

Die CHAMP-Mission bietet mit den kontinuierlichen Navigationsmessungen der GPS-Zenitantenne an Bord des Satelliten erstmals eine zu diesem Zweck gut geeignete Datenbasis. Die im Rahmen dieser Arbeit realisierte Rekonstruktion der dreidimensionalen Elektronendichteverteilung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre, welche auf diesen global verteilten satellitengebundenen GPS-Messungen basiert, stellt daher eine wissenschaftliche Neuheit dar.

Die Nutzung der CHAMP-GPS-Daten zur Fernerkundung der Ionosphäre und Plasmasphäre erforderte zunächst eine geeignete Datenprozessierung zur Ableitung der integralen TEC-Informationen entlang der jeweiligen Strahlenwege. In diesem Zusammenhang wurden existierende Algorithmen zur Qualitätssicherung von GPS-Bodenstationsdaten aufgegriffen und erfolgreich für die Anwendung auf satellitengebundene GPS-Daten modifiziert. Zur notwendigen Kalibrierung der aus den differentiellen GPS-Trägerphasendifferenzen (L1-L2) abzuleitenden relativen TEC-Informationen wurden einerseits bestehende Methoden zur Lösung der Phasenmehrdeutigkeiten von GPS-Bodenstationsmessungen zur Anwendung auf die CHAMP-GPS-Daten angepasst. Andererseits erfolgte die Entwicklung eines eigenen Verfahrens zur Bestimmung des unbekanntem instrumentellen Biases des GPS-Empfängers an Bord von CHAMP. Dieses ermöglicht unter Verwendung der bekannten GPS-Biases und des Ionosphären- und Plasmasphärenmodells PIM eine stabile Bestimmung des zur Kalibrierung benötigten Empfängerbiases.

Es wurde herausgearbeitet, dass die Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre aus den zur Verfügung stehenden strahlenwegbezogenen TEC-Messungen prinzipiell als Lösung eines unterbestimmten Gleichungssystems betrachtet werden kann, welche die Definition eines Systems von Volumenzellen erfordert und der Verwendung von Zusatzinformationen bzw. -annahmen bedarf. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine der Problemstellung angemessene Voxel-Struktur definiert und einschließlich ihrer mathematischen Handhabung ausführlich beschrieben. Die Lösung des erwähnten unterbestimmten Gleichungssystems erfolgt durch Assimilation der strahlenwegbezogenen TEC-Messungen in ein initiales Modell (PIM). Diese Verfahrensweise ermöglicht die Berücksichtigung der benötigten Zusatzinformationen durch

die Verwendung einer physikalisch sinnvollen Elektronendichteverteilung als Anfangsannahme. Auch die spezielle Formgebung der verwendeten Voxel-Struktur enthält eine wichtige Zusatzannahme über die zu rekonstruierende Elektronendichteverteilung. Zur Assimilation wurden grundsätzlich die strahlenwegbezogenen TEC-Messungen eines vollständigen CHAMP-Umlaufs verwendet. Das entwickelte Assimilationsverfahren basiert auf einem iterativen Algorithmus, durch den die initiale Annahme der Elektronendichteverteilung im Rahmen der definierten Voxel-Struktur schrittweise so modifiziert wird, dass sie schließlich weitgehend den zu assimilierenden TEC-Messungen entspricht. Die Grundprinzipien sowie die konkrete Umsetzung dieses Verfahrens wurden in der vorliegenden Arbeit umfassend dargelegt und diskutiert.

Alle zur rechen-technischen Umsetzung der Problemstellung dieser Arbeit entwickelten Softwaremodule wurden unter operationellen Gesichtspunkten für den Betrieb im automatischen Prozessierungssystem der CHAMP-Ionosphären- und Plasmasphären-Daten konzipiert, implementiert und getestet. Eine Einbindung in dieses Prozessierungssystem ist für die Zukunft vorgesehen.

Die vorgestellten Verfahren, Methoden und Algorithmen zur Ableitung dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen aus den CHAMP-GPS-Messungen bilden das Kernergebnis der vorliegenden Arbeit. Die mit dem entwickelten Assimilationsverfahren unter Verwendung von CHAMP-GPS-Daten rekonstruierten Elektronendichteverteilungen wurden anhand konkreter Beispiele präsentiert. Die Darstellung der dreidimensionalen Assimilationsergebnisse erfolgte dabei in Form meridionaler Schnitte entlang der jeweiligen Orbitebene. Es ist damit im Rahmen dieser Arbeit erstmals gelungen, solche quasi momentanen zweidimensionalen Darstellungen der globalen Elektronendichteverteilung im Bereich der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre aus Messungen, die einen Zeitraum von jeweils nur 93 Minuten umfassen, abzuleiten.

Anhand der präsentierten Validierungsergebnisse mit unabhängigen Elektronendichtemessungen der Langmuir-Sonde an Bord von CHAMP, von Incoherent-Scatter-Radars und Ionosonden konnte die prinzipielle Eignung des vorgestellten Assimilationsverfahrens zur Rekonstruktion lokaler Elektronendichten aus integralen TEC-Messungen nachgewiesen sowie eine qualitative Einschätzung der erhaltenen Resultate durchgeführt werden. Ein umfassender Vergleich mit den Messungen der Langmuir-Sonde ermöglichte auch quantitative Aussagen über die erreichte Genauigkeit bei der Rekonstruktion der Elektronendichten entlang der CHAMP-Flugbahn. Im Rahmen der Validierung war allgemein festzustellen, dass die Assimilationsergebnisse deutlich besser mit den zum Vergleich verfügbaren unabhängigen Elektronendichtemessungen übereinstimmten als die initialen Modellannahmen. Es wurde jedoch auch deutlich, dass im Einzelfall erhebliche Differenzen zwischen Assimilationsergebnissen und Validierungsdaten bestehen können. Dies gilt insbesondere für die niederen Breiten des abendlichen Lokalzeitsektors. Hier konnten die initialen Modellannahmen im Bereich der CHAMP-Flugbahn durch die Assimilation nur unwesentlich verbessert werden. Die möglichen Ursachen für diesen Sachverhalt wurden ausführlich diskutiert. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass dieses Problem in erster Linie die Grenzen des Informationsgehaltes der zur Assimilation vorliegenden TEC-Messungen dokumentiert und nicht als prinzipieller Mangel des verwendeten Assimilationsverfahrens zu werten ist.

Die Validierung der Assimilationsergebnisse ist mit den in dieser Arbeit präsentierten Resultaten keineswegs als abgeschlossen zu betrachten, sondern soll mit weiteren Validierungsdatensätzen fortgeführt werden. Dazu bieten sich Messungen von Incoherent-Scatter-Radars sowie eventuelle in-situ-Messungen zukünftiger Satellitenmissionen an. Wertvolle Validierungsdaten aus dem Bereich der Plasmasphäre sind in der Zukunft von den Ergebnissen der Satellitenmission IMAGE (Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration) zu erwarten.

Nach umfassender Validierung könnte das vorgestellte Assimilationsverfahren bei Nachweis hinreichender Zuverlässigkeit eine Basis zur Beobachtung und Diskussion ionosphärischer und plasmasphärischer Phänomene bieten und damit zur Gewinnung neuer Erkenntnisse über die bislang wenig erforschte Topside-Ionosphäre und Plasmasphäre beitragen. Wie die bisherigen Validierungsergebnisse eindeutig belegen, führt die Assimilation generell zu einer Verbesserung der initialen Modellannahmen. Daher sollten die Assimilationsergebnisse eines längeren Zeitraums, welche dann auch alle Lokalzeitsektoren abdecken, prinzipiell eine gute Datenbasis für ein neues, gegenüber PIM verbessertes empirisches Modell der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre bieten. Dieses könnte dann wiederum als initiales Modell für die Assimilation fungieren und damit zu einer weiteren Verbesserung der abzuleitenden Assimilationsergebnisse führen.

Das hier vorgestellte Assimilationsverfahren erlaubt prinzipiell die Einbeziehung von sowohl boden- als auch satellitengestützten TEC-Messungen sowie von in-situ-Messungen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die GPS-Navigationsmessungen nur eines LEO's zur Rekonstruktion der Elektronendichteverteilung verwendet. Aufgrund der Beobachtungsgeometrie wird dabei vor allem der Bereich der Orbitebene durch den Assimilationsprozess erfasst, während andere Bereiche der global angelegten Voxel-Struktur im Rahmen eines sinnvollen Assimilationszeitraums von den Messungen völlig unberührt bleiben. Mit Blick auf bereits gestartete (z.B. GRACE, GRAvity recovery and Climate Experiment) sowie geplante (z.B. COSMIC, Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate) mit GPS-Empfängern ausgestattete LEO-Missionen könnte es in der Zukunft möglich werden, das hier vorgestellte Verfahren zu einer permanenten globalen Beobachtung der Elektronendichte der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre zu verwenden. Dabei wäre wegen der zunehmenden Menge der zu assimilierenden TEC-Informationen mit einer generellen Verbesserung der erreichbaren Assimilationsergebnisse zu rechnen. Eine solche bislang nicht existierende Beobachtungsmöglichkeit würde wertvolle Beiträge zur Modellierung vor allem der Plasmasphäre leisten und wäre im Hinblick auf eine zukünftige operationelle Nutzung des Verfahrens auch für die Überwachung des sogenannten Weltraumwetters von erheblicher Bedeutung.