

1 Einführung und Zielstellung

Die Ionosphäre unterscheidet sich von den darunter liegenden neutralen Schichten der Erdatmosphäre im Wesentlichen durch die Anwesenheit frei beweglicher Elektronen und Ionen. Die Ionisation wird dabei hauptsächlich durch die Ultraviolett- und Röntgenstrahlung der Sonne hervorgerufen. Aufgrund der vergleichsweise geringen Gasdichte im Bereich der Ionosphäre kommt es nach der Ionisation zu einer verzögerten Rekombination der freien Elektronen und Ionen, woraus in Abhängigkeit von der Sonneneinstrahlung eine permanente Anwesenheit freier Ladungsträger resultiert. Die Ionosphäre erstreckt sich über einen Höhenbereich von etwa 60 km bis 1000 km und geht dann fließend in die Plasmasphäre über, welche an der Plasmopause endet. Die Plasmopause befindet sich in äquatorialen Breiten in einer Höhe von etwa 3 bis 6 Erdradien. Eine bedeutende Größe zur Beschreibung der Ionosphäre ist die lokale Elektronendichte.

Das wissenschaftliche Interesse an der Ionosphäre und Plasmasphäre erwächst im Wesentlichen aus deren Eigenschaft, die Ausbreitung von Radiowellen zu beeinflussen. Der internationale Kurzwellenfunkverkehr basiert z.B. auf der Tatsache, dass Radiowellen mit Frequenzen unterhalb 30 MHz im Allgemeinen von der Ionosphäre reflektiert werden. Höherfrequente Radiowellen passieren hingegen die Ionosphäre und Plasmasphäre und eignen sich daher für die Kommunikation zwischen der Erde und Satelliten. Allerdings werden auch diese transionosphärischen Signale von der Ionosphäre und Plasmasphäre beeinflusst. In bestimmten Situationen können durch ionosphärische Irregularitäten ausgelöste Szintillationen Radiosignale derartig stark degradieren, dass deren Empfang unmöglich wird. Dadurch kann die Ionosphäre die Leistung und die Zuverlässigkeit moderner Satellitenkommunikations- und -navigationssysteme zeitweise erheblich herabsetzen. Weiterhin bilden Ionosphäre und Plasmasphäre eine bedeutende Komponente des sogenannten Weltraumwetters, welches im Wesentlichen durch solare Aktivitäten wie Strahlung und interplanetares Magnetfeld bestimmt wird. Das Weltraumwetter beeinflusst und gefährdet insbesondere technische Systeme und menschliches Leben im Erdorbit, aber unter Umständen auch auf der Erde selbst. Unsere moderne Gesellschaft ist in vielerlei Hinsicht von der Nutzung und Funktionsfähigkeit satellitengestützter Systeme abhängig. Daher ist es von Bedeutung, das System Ionosphäre/Plasmasphäre als Ausbreitungsmedium von Radiowellen und als Bestandteil des Weltraumwetters zu verstehen, um Aussagen über die Nutzbarkeit, Zuverlässigkeit und Gefährdung solcher Systeme treffen zu können.

Die Brechung von Radiowellen durch die Ionosphäre und Plasmasphäre beeinträchtigt auch grundsätzlich die Genauigkeit der satellitengestützten Navigation und macht entsprechende Korrekturen der Navigationssignale erforderlich. Dabei sind Modelle der Ionosphäre und Plasmasphäre unentbehrlich.

Die Beobachtung des Systems Ionosphäre/Plasmasphäre ist eine Grundvoraussetzung zu dessen Verständnis bzw. Modellierung. Die Ionosphäre wird bereits seit den 30er Jahren des vergangenen Jahrhunderts insbesondere mit Ionosonden vom Boden aus beobachtet. So ist der Höhenbereich bis ca. 300 km heute weitgehend erforscht. Die obere Ionosphäre und die Plasmasphäre entziehen sich hingegen weitgehend der bodengebundenen Beobachtung. Wesentliche Kenntnisse über diese Gebiete konnten erst durch Satellitenmissionen und Raketenstarts gewonnen werden. Insbesondere die Plasmasphäre ist aufgrund der schwierigen Beobachtungsbedingungen bis in die heutigen Tage ein wenig erforschtes Gebiet. Die bekannten Modelle der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre stützen sich nur auf vergleichsweise geringe Datenmengen und weisen daher noch erhebliche Mängel auf (z.B. *Bilitza und Williamson, 2000*). Vor dem Hintergrund der Bedeutung dieser Modelle ist es ein notwendiges und lohnendes Ziel, existierende Mängel

zu beheben und die Modelle zu verbessern. Dazu ist die Gewinnung neuer Beobachtungsdaten aus dem Bereich der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre erforderlich. Der offensichtliche Bedarf an neuen Informationen über den Ionisationszustand der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre stellt neben dem rein wissenschaftlichen Interesse an der bisher wenig erforschten Plasmasphäre eine wesentliche Motivation für die vorliegende Arbeit dar.

Elektromagnetische Wellen, wie sie im Bereich der Satellitennavigation Anwendung finden, unterliegen auf ihrem Weg durch die verschiedenen Schichten der Atmosphäre einer komplexen Beeinflussung, die sich in Änderungen der Phase, Amplitude und Polarisation des Signals niederschlägt. Während diese Einflüsse im Sinne einer genauen Navigationslösung als störend zu betrachten und sorgfältig zu korrigieren sind, bieten sie gleichzeitig die Grundlage für die Fernerkundung der Atmosphäre mit Navigationssignalen. Auf dieser Basis entwickelten sich eigenständige Verfahren zur Fernerkundung sowohl des neutralen als auch des ionisierten Teils der Erdatmosphäre.

Im Bereich der zur Satellitennavigation verwendeten Signalfrequenzen stellen Ionosphäre und Plasmasphäre ein dispersives Ausbreitungsmedium dar, d.h., der Einfluss der Ionosphäre hängt von der Signalfrequenz ab. Daher ermöglicht der simultane Empfang zweier solcher Signale unterschiedlicher Frequenz, die sich entlang eines gemeinsamen Signalweges ausbreiten, prinzipiell die Fernerkundung der Ionosphäre. Globale Satellitennavigationssysteme (Global Navigation Satellite Systems oder GNSS) wie das amerikanische Global Positioning System (GPS) oder das russische GLObal'naya Navigationnaya Sputnikovaya Sistema (GLONASS) senden ihre Navigationssignale jeweils auf zwei kohärenten Trägerfrequenzen im L-Band und eignen sich daher als Signalquellen zur Ionosphärenfernerkundung.

Bereits das in den sechziger Jahren aufgebaute Navy Navigational Satellite System (NNSS), dessen Konstellation aus sieben nahezu polumlaufernden Satelliten mit etwa 1100 km Orbithöhe bestand, wurde und wird bis in die heutigen Tage zu wissenschaftlichen Untersuchungen der Ionosphäre verwendet (z.B. *Leitinger et al.*, 1984, *Fehmers* 1996). Mit zunehmendem Ausbau des GPS wurde es gegen Ende der achtziger Jahre möglich, aus Zweifrequenz-GPS-Messungen Informationen über die Ionosphäre zu gewinnen (z.B. *Lanyi und Roth*, 1988, *Beutler et al.*, 1989). Das GPS besteht derzeit aus 28 Satelliten, die bei einer Orbithöhe von etwa 20000 km auf 6 Orbitebenen verteilt sind. Es bietet seit seinem vollen Ausbau eine sehr gute Möglichkeit, die Ionosphäre sowohl regional als auch global mit einem vergleichsweise geringen Aufwand permanent zu beobachten. Dabei fanden zunächst Bodenstationsmessungen Verwendung, wie sie z.B. durch das Netzwerk des IGS (International GPS Service for Geodynamics) durchgeführt werden. Seit Juni 1992 stellt der IGS neben vielen anderen geophysikalisch interessanten Informationen ununterbrochen GPS-Beobachtungen seines weltweiten Netzwerks von GPS-Empfangsstationen und hochgenaue Orbitdaten der GPS-Satelliten zur Verfügung (*Beutler et al.*, 1994). Mit dieser Datenbasis wurde es möglich, die Ionosphäre und insbesondere deren integralen Elektronendichtegehalt (vertical Total Electron Content oder vTEC) permanent zu beobachten. Der vTEC-Wert wird in Elektronen pro Quadratmeter angegeben und lässt sich quasi als Elektronendruck recht anschaulich mit dem aus der Meteorologie bekannten Luftdruck vergleichen. Sogenannte vTEC-Karten werden sowohl im regionalen als auch im globalen Maßstab routinemäßig erstellt, z.B. durch das Institut für Kommunikation und Navigation (IKN) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) permanent seit Februar 1995 für den europäischen Raum (*Jakowski*, 1996) oder durch verschiedene Analysezentren des IGS, wie z.B. CODE (Center of Orbit Determination in Europe) für Europa und im globalen Maßstab (*Schaer*, 1999). So gewonnene Informationen über das Verhalten der Ionosphäre stellen auch einen wertvollen Beitrag zur Verbesserung der Ionosphärenmodellierung dar.

Völlig neue Aspekte für die Fernerkundung der Erdatmosphäre und insbesondere der Ionosphäre und Plasmasphäre ergeben sich durch den Einsatz von GPS-Empfängern an Bord niedrig fliegender erdumlaufender Satelliten (Low Earth Orbiters oder LEOs) mit typischen Flughöhen von 400 bis 1000 km auf polnahen Umlaufbahnen. Durch die im Vergleich zu den GPS-Satelliten kurzen Umlaufzeiten der LEOs (etwa 90 Minuten gegenüber etwa 12 Stunden pro Orbit) wird es möglich, die Radio-Okkultationstechnik zur Fernerkundung der Erdatmosphäre mit Satellitennavigationssignalen einzusetzen. Dieses Verfahren wurde bereits seit Mitte der sechziger Jahre mit großem Erfolg zur Fernerkundung von Temperatur und Dichte der Atmosphären von Mars und Venus (*Fjeldbo et al.*, 1968 und 1971) verwendet. Bei der Radio-Okkultationstechnik mit GPS werden die Signale von unter- oder aufgehenden GPS-Satelliten verwendet, um die vertikale Struktur der Atmosphäre mit zeitlich hoher Auflösung (bis zu 50 Hz) zu sondieren und aus diesen Messungen atmosphärische Profile von Temperatur, Druck und Wasserdampfgehalt (z.B. *Ware et al.*, 1996) aber auch ionosphärische Elektronendichteprofile (z.B. *Hajj et al.*, 1994, 1998) abzuleiten. Die so erhaltenen atmosphärischen Profile sind global verteilt und könnten in der Zukunft bei einer wachsenden Zahl von LEO-Missionen eine wertvolle Datenbasis sowohl für klimatologische Untersuchungen und Modelle als auch für die operationelle Wettervorhersage bieten, insbesondere durch Schließung der großen Datenlücken im Bereich der Ozeane. Eine ebenso wertvolle Datenquelle stellen die Elektronendichteprofile für die weitere Erforschung und Modellierung der Ionosphäre dar.

Der im April 1995 gestartete US-amerikanische Kleinsatellit Microlab-1 hatte zur Durchführung des GPS/MET (GPS Meteorology) Experiments (*GPS/MET*, 2002) als erster LEO-Satellit einen GPS-Empfänger zur Durchführung von Okkultationsmessungen an Bord und konnte das hohe Potenzial dieses Verfahrens zur Ableitung atmosphärischer Profile sowohl im Bereich der neutralen (z.B. *Kursinski et al.*, 1996, *Rocken et al.*, 1997) als auch der ionisierten (z.B. *Rius et al.*, 1998, *Hajj et al.*, 1998, *Schreiner et al.*, 1999) Atmosphäre demonstrieren.

Am 15. Juli 2000 startete der deutsche Kleinsatellit CHAMP (CHALLENGING Minisatellite Payload, *Reigber et al.*, 2000) erfolgreich zu seiner Mission in den erdnahen Orbit. Seine Umlaufbahn ist mit 87,5 Grad Inklination nahezu polar. Die wissenschaftlichen Ziele der CHAMP-Mission konzentrieren sich auf die Untersuchung des Schwerefeldes und des Magnetfeldes der Erde sowie auf die Fernerkundung der neutralen und ionisierten Erdatmosphäre mit GPS-Messungen. Der CHAMP-Satellit verfügt im Gegensatz zu Microlab-1 über mehrere GPS-Antennen und besitzt eine stabile Fluglage. Zusätzlich zu den beiden in Gegenflugrichtung weisenden Okkultationsantennen besitzt CHAMP eine nach unten gerichtete GPS-Antenne zur Messung von an Wasseroberflächen reflektierten GPS-Signalen sowie eine Zenitantenne für GPS-Messungen zur hochgenauen Orbitbestimmung. Die GPS-Messungen mit der Zenitantenne werden permanent mit einer Rate von 0,1 Hz durchgeführt. Der GPS-Empfänger an Bord von CHAMP ermöglicht dabei den gleichzeitigen Empfang von bis zu 12 GPS-Satelliten. Diese Navigationssignale bieten erstmals die Möglichkeit einer GPS-basierten permanenten Beobachtung der oberen Ionosphäre und Plasmasphäre im globalem Maßstab. Microlab-1 konnte wegen der eingeschränkten Antennenkonstellation und der instabilen Fluglage noch keine vergleichbaren Messungen liefern.

Gegenstand dieser Promotionsarbeit soll es sein, basierend auf satellitengestützten GPS-Messungen an Bord von CHAMP globale dreidimensionale Elektronendichteverteilungen im Bereich der oberen Ionosphäre und der Plasmasphäre zu bestimmen. Dazu ist es zunächst erforderlich, entsprechende Methoden zu erarbeiten, Algorithmen zu entwickeln und diese zu testen. Weiterhin sollen die abgeleiteten Ergebnisse mit unabhängigen Messdaten (z.B. Langmuir-Sonde oder Incoherent-Scatter-Radar) validiert werden.