

Hochschule Neubrandenburg  
Studiengang Geoinformatik und Geodäsie

**Untersuchung der zeitlichen und räumlichen  
Reaktion der Ionosphäre auf die solare  
EUV-Strahlung**

**Masterthesis**

vorgelegt von: Erik Schmölder

Zum Erlangen des akademischen Grades  
**„Master of Engineering“ (M.Eng.)**



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences



Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig  
Zweitprüfer: Dr. rer. nat. Jens Berdermann

Bearbeitungszeitraum: 14.04.2014 – 14.10.2014

URN: urn:nbn:de:gbv:519-thesis2014-0609-9

## Kurzfassung

Entscheidende physikalische und chemische Prozesse in der Ionosphäre werden in komplexen Wechselwirkungen durch die solare Strahlung gesteuert. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit die räumliche und zeitliche Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung untersucht. Der wesentliche Unterschied zu vorangegangenen Analysen, die zu meist Indizes wie den F10.7 genutzt haben, ist die Verwendung von Beobachtungen des EUV-Flusses über lange Zeiträume als direktes Maß für die solare Aktivität.

Mit den vorliegenden F10.7-, EUV- und TEC-Daten wird der Zusammenhang zu bereits bestehenden Untersuchungen hergestellt, um darauf aufbauend die Reaktion von TEC auf Variationen der EUV-Strahlung in hoher zeitlicher Auflösung für äquatoriale und mittlere Breiten zu beschreiben. Die auftretende Verzögerung zwischen EUV und TEC wird tiefergehend betrachtet und der Einfluss der EUV-Strahlung bestimmter Wellenlängenbereiche auf die Schichten der Ionosphäre wird in Hinblick auf diese Reaktionszeit charakterisiert. Die Kreuzkorrelationen von TEC und EUV werden hierzu diskutiert und zur Ableitung weiterer Darstellungen angewendet, um das räumliche Verhalten der verzögerten Reaktion im Detail beurteilen zu können.

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der solaren Strahlung auf die Ionosphäre sind für die Entwicklung von zutreffenden Ionosphärenmodellen von Bedeutung.

## **Abstract**

Crucial physical and chemical processes in the ionosphere are driven in complex interactions by the solar radiation. For this reason, this paper describes the spatial and temporal response of the ionosphere to the solar EUV radiation. The major difference from previous analyses, which have mostly applied indices such as the F10.7, is the use of observations of the EUV flux over a long period as a direct measure of the solar activity.

Outstanding issues of previous studies are answered with the available F10.7, EUV and TEC data. The response of TEC to variations of the EUV radiation is described for equatorial regions and mid-latitudes with high temporal resolution. The delay, which occurs between the EUV and TEC, is examined in more detail. The influence of the EUV radiation over specific wavelength ranges on the layers of the ionosphere is characterized with regard to this reaction time. The cross-correlations of TEC and EUV are discussed and processed further to describe the spatial variations of the delayed reaction in more detail.

The gained knowledge of the influence of solar radiation on the ionosphere is important for the development of realistic ionospheric models.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Die Atmosphäre der Erde</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Aufbau der Ionosphäre</b>	<b>6</b>
3.1	Die Schichten der Ionosphäre . . . . .	6
3.2	Die Zusammensetzung und Balance der Ionosphäre . . . . .	7
<b>4</b>	<b>Die solare Strahlung</b>	<b>11</b>
4.1	Die Sonne . . . . .	11
4.2	Sonnenwind . . . . .	12
4.3	Sonnenflecken und Sonnenfleckenzyklus . . . . .	13
4.4	Sonneneruptionen und koronale Massenauswürfe . . . . .	13
4.5	Spektrum der solaren Strahlung . . . . .	13
<b>5</b>	<b>Bestimmung der solaren EUV-Strahlung</b>	<b>16</b>
5.1	SolACES . . . . .	17
5.2	SDO (EVE) . . . . .	18
5.3	PROBA2 (LYRA) . . . . .	20
5.4	GOES . . . . .	20
5.5	Gegenüberstellung . . . . .	21
<b>6</b>	<b>Einfluss der solaren Strahlung auf die Ionosphäre</b>	<b>25</b>
6.1	Die Absorption solarer Strahlung . . . . .	25
6.2	Photoionisation . . . . .	28
6.3	Photodissoziation . . . . .	29
6.4	Änderungen der Ionosphäre durch solare Aktivität . . . . .	31
<b>7</b>	<b>Bedeutung der Ionosphäre für die Kommunikation und Navigation</b>	<b>33</b>
7.1	Der ionosphärische Brechungsindex . . . . .	33
7.2	GNSS-Signalausbreitung in der Ionosphäre . . . . .	35
<b>8</b>	<b>Beobachtung und Modellierung der Ionosphäre</b>	<b>39</b>
8.1	International Reference Ionosphere . . . . .	39
8.2	Bedeutung der TEC-Modellierung . . . . .	40
8.3	SWACI TEC-Karten . . . . .	41
8.3.1	GNSS-basierte Beobachtung und Modellierung von TEC . . . . .	41
8.3.2	TEC-Kalibrierung von GNSS-Messungen . . . . .	42

8.3.3	TEC-Mapping . . . . .	45
8.3.4	TEC-Vorhersage . . . . .	46
8.4	IGS TEC-Karten . . . . .	47
8.5	Vergleich der SWACI und IGS TEC-Karten . . . . .	49
8.6	Bedeutung des F10.7 für die Modellierung der Ionosphäre . . . . .	50
<b>9</b>	<b>Solare EUV-Strahlung und TEC</b>	<b>56</b>
<b>10</b>	<b>Ergebnisse im Hinblick auf potentielle Verbesserungsmöglichkeiten der Ionosphärenmodellierung</b>	<b>66</b>
10.1	Qualitätsverbesserung von TEC-Karten . . . . .	66
10.2	Vorschläge zur Optimierung von Modellen . . . . .	67
<b>11</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>69</b>

## Abbildungsverzeichnis

1	Temperaturprofil der Atmosphäre und Plasmadichteprofil der Ionosphäre	5
2	Zusammensetzung der Atmosphäre am Tag . . . . .	8
3	Korona der Sonne . . . . .	12
4	Sonneneruptionen . . . . .	14
5	Solare spektrale Strahlung . . . . .	15
6	Anordnung von SolACES Komponenten . . . . .	18
7	Aufbau MEGS-A . . . . .	19
8	Aufbau MEGS-B . . . . .	19
9	Aufbau eines EUVS . . . . .	21
10	Kanal für die Lyman-Alpha-Spektrallinie in GOES und LYRA . . . . .	23
11	GOES im Band B und SDO(EVE) für 25 bis 35 nm . . . . .	24
12	Prozesse in der Ionosphäre . . . . .	26
13	Photoionisationsraten . . . . .	30
14	Entfernungsmessfehler durch ionosphärische Brechung . . . . .	35
15	Reflektion in der Ionosphäre . . . . .	37
16	Beispiel für NTCM-GL . . . . .	45
17	Beispiel für globale TEC-Karte . . . . .	47
18	Beispiel für einstündige TEC-Vorhersage . . . . .	48
19	Ergebnisse: Vergleich TEC DLR, ESA und UPC . . . . .	51
20	Ergebnisse: Vergleich F10.7 und EUV (1) . . . . .	53
21	Ergebnisse: Vergleich F10.7 und EUV (2) . . . . .	54
22	Ergebnisse: Vergleich TEC und EUV (1) . . . . .	57
23	Ergebnisse: Vergleich TEC und EUV (2) . . . . .	58
24	Karte: Verzögerte Reaktion der Ionosphäre (1) . . . . .	60
25	Karte: Verzögerte Reaktion der Ionosphäre (2) . . . . .	61
26	Karte: Verzögerte Reaktion der Ionosphäre (3) . . . . .	62
27	Gemittelter Verlauf der Verzögerung . . . . .	63
28	Gemittelter Verlauf des Korrelationskoeffizienten . . . . .	64

## Tabellenverzeichnis

1	Ionisierungspotentiale . . . . .	9
2	Vergleich von SolACES, SDO(EVE), PROBA2(LYRA), GOES . . . . .	22

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AIA</b>	Atmospheric Imaging Assembly
<b>CODE</b>	Center of Orbit Determination in Europe
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<b>EUV</b>	Extreme Ultraviolet
<b>EUVS</b>	EUV Sensor
<b>EVE</b>	EUV Variability Experiment
<b>GLONASS</b>	Globales Satellitennavigationssystem
<b>GNSS</b>	Global Navigation Satellite System
<b>GOES</b>	Geostationary Operational Environmental Satellite
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>HMI</b>	Helioseismic and Magnetic Imager
<b>IGS</b>	International GNSS Service
<b>IRI</b>	International Reference Ionosphere
<b>ISS</b>	International Space Station
<b>JPL</b>	Jet Propulsion Laboratory
<b>LYRA</b>	Large Yield Radiometer
<b>NASA</b>	National Aeronautics and Space Administration
<b>NTCM</b>	Neustrelitz TEC Model
<b>PROBA</b>	Project for On-Board Autonomy
<b>SBAS</b>	Satellite Based Augmentation System
<b>SDO</b>	Solar Dynamics Observatory
<b>SEE</b>	Solar EUV Experiment
<b>SoIACES</b>	Solar Auto-Calibrating EUV/UV Spectrophotometers
<b>SOLSPEC</b>	Solar Spectral Irradiance Measurements
<b>SOVIM</b>	Solar Variations and Irradiance Monitor

<b>SWAP</b>	Sun Watcher using Active Pixel System Detector and Image Processing
<b>TEC</b>	Total Electron Content
<b>TECU</b>	TEC Unit
<b>UPC</b>	Technical University of Catalonia
<b>UV</b>	Ultraviolet



# 1 Einführung

Die moderne Gesellschaft ist abhängig von einer komplexen technologischen Infrastruktur, die viele Bereiche des Lebens auf der Erde beeinflusst. Ein entscheidender Bestandteil dieser Infrastruktur sind globale Navigationssatellitensysteme, die zur Positionsbestimmung und Navigation genutzt werden und Grundlage für zahlreiche Anwendungen sind; zum Beispiel sind Verkehrsleitsysteme, die Landesvermessung oder Kommunikationsdienste abhängig von solchen Systemen. Problematisch ist die Anfälligkeit dieser Technologien gegenüber Ereignissen des Weltraumwetters, die sich als Störungen in der Atmosphäre und im Besonderen der Ionosphäre äußern. Aus diesem Grund ist es von entscheidender Bedeutung, die Ionosphäre zu verstehen.

Erscheinungen in der Ionosphäre wurden sehr früh durch die Menschheit wahrgenommen. Schon im antiken Griechenland erwähnte Aristoteles in seinem Werk *Meteorologica* ein ionosphärisches Phänomen, die Aurora Borealis. Eine der ersten wissenschaftlichen Erklärungen, die die Rolle von den Teilchen der Erdatmosphäre und dem Einfluss der Sonnenstrahlung erkannte, lieferte EULER [1746] für dieses Phänomen. Es folgten weitere Theorien zur Entstehung der Aurora Borealis und durch CAVENDISH [1790] wurde eines ihrer Merkmale, die Höhe, zum ersten Mal charakterisiert. Etwa zur gleichen Zeit wurde auch der Zusammenhang zur Variation der Sonnenfleckenzahl entdeckt. Das Auftreten von Sonnenflecken hatte Galileo Galilei im 17. Jahrhundert entdeckt; die periodische Variation der Anzahl der Sonnenflecken war unter anderem durch SCHWABE [1843] bekannt. Eine erste treffende Beschreibung der Ionosphäre erfolgte durch GAUSS [1841] und STEWART [1882], die elektrische Ladungen in der Atmosphäre vermuteten. Bewiesen wurden diese grundlegenden Theorien zur Ionosphäre durch die Übertragung von Radiowellen über den Atlantik [LODGE, 1902]. Als Ursache für die Entstehung der Ionosphäre wurde darauf durch TAYLOR [1903] die solare ultraviolette Strahlung identifiziert. Die Ionosphäre konnte in der folgenden Zeit zunehmend genauer beschrieben werden und mit der Verfügbarkeit von Raketen nach dem Zweiten Weltkrieg sowie dem anschließenden Beginn von Satellitenmissionen war es möglich, die Ionosphäre und die solare Strahlung direkt zu beobachten. Die Zunahme an technischen Möglichkeiten für die Beobachtung und der Gewinn an Wissen über die Ionosphäre erlauben es heute, Ionosphärenmodelle anzufertigen, die viele chemische und physikalische Prozesse abbilden. Außerdem lassen sich Untersuchungen zu offenen Problemen gezielt durchführen.

Der Einfluss der solaren ultravioletten (UV) und extremen ultravioletten (EUV) Strahlung ist für die Ionosphäre entscheidend, da diese Strahlung wesentliche Prozesse kon-

trolliert, die das Entstehen und die Veränderungen der Ionosphäre verursachen. In der Vergangenheit wurden verschiedene Untersuchungen zu diesem Thema durchgeführt. So wurde zum Beispiel durch JAKOWSKI et al. [1994] untersucht, wie sich die temporale Variabilität der solaren Strahlung auf die Ionosphäre auswirkt. Die Strahlungsvariationen wurden in der Arbeit mithilfe des solaren Radioflusses parametrisiert, da zu der Zeit noch keine kontinuierlichen EUV-Daten für große Zeiträume verfügbar waren. Diese Situation hat sich in den letzten Jahren durch verschiedene aktuelle Missionen zur Messung der solaren EUV-Strahlung geändert. Damit kann eine Untersuchung der Reaktion der Ionosphäre auf Änderungen der solaren Aktivität, der solaren EUV-Strahlung, mit Messdaten durchgeführt werden. Neben dem Zusammenhang von mittelfristigen Variationen der solaren Aktivität und der Ionosphäre wurde in JAKOWSKI et al. [1994] eine Verzögerung für die Reaktion der Ionosphäre festgestellt (1 bis 3 Tage), die ebenfalls mit den neuen Daten untersucht werden soll. Diese verzögerte Reaktion wurde auch in JAKOWSKI et al. [1991], OINATS et al. [2008] oder KUTIEV et al. [2013] mithilfe von Indizes für die solare Strahlung festgestellt.

Als Einstieg in die Problematik werden im Rahmen dieser Arbeit zunächst der Aufbau der Atmosphäre und Ionosphäre vorgestellt (siehe Kapitel 2 und Kapitel 3). Die solare Strahlung wird charakterisiert und die besondere Rolle der EUV-Strahlung herausgestellt (siehe Kapitel 4). Der Einfluss der solaren Strahlung auf die Ionosphäre und die Bedeutung für technische Systeme wird im Anschluss beschrieben (siehe Kapitel 6 und Kapitel 7). Hierbei wird besonders auf die Auswirkungen für globale Navigationssysteme eingegangen, da diese Systeme empfindlich auf Änderungen der ionosphärischen Bedingungen reagieren und entscheidend für viele Anwendungen und Dienste auf der Erde sind.

Um eine Untersuchung der verzögerten Reaktion der Ionosphäre aufgrund der solaren EUV-Strahlung durchführen zu können, werden verschiedene Missionen bezüglich ihrer Eignung verglichen (siehe Kapitel 5).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden verschiedene Verfahren für die Beobachtung und Modellierung der Ionosphäre vorgestellt (siehe Kapitel 8). Die zugehörigen Datensätze werden ebenfalls untereinander verglichen. Um den Zusammenhang zu vorangegangenen Untersuchungen herauszustellen, wird die solare EUV-Strahlung mit dem solaren Radioflussindex verglichen. Durch das Ausschließen einer Verzögerung zwischen beobachteter solarer Aktivität und dem Index wird eine entscheidende Frage geklärt, die in JAKOWSKI et al. [1994] aufgrund der fehlenden Daten zur EUV-Strahlung noch nicht beantwortet werden konnte.

Die Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung wird mithilfe der gegebenen Datensätze für die EUV-Strahlung und die Gesamtelektronenzahl der Ionosphäre durchgeführt (siehe Kapitel 9). Abschließend werden die Ergebnisse in Hinblick auf mögliche Verbesserungsmöglichkeiten für die Modellierung der Ionosphäre diskutiert (siehe Kapitel 10).

## 2 Die Atmosphäre der Erde

Die gasförmige Hülle, welche die Erde komplett umschließt, wird als Atmosphäre der Erde bezeichnet. Sie wird durch die Schwerkraft der Erde horizontal strukturiert und lässt sich über ihr Temperaturprofil in Schichten aufteilen.

Die Troposphäre ist die unterste Schicht der Atmosphäre und reicht von der Erdoberfläche bis zu Höhen von 7 km über den Polen und bis zu 18 km über dem Äquator. Die Troposphäre ist dichter als die restlichen Bereiche der Atmosphäre und macht 75% ihrer Gesamtmasse aus. Außerdem finden die meisten Wettererscheinungen in der Troposphäre statt. Wie in Abbildung 1 zu sehen, nimmt die Temperatur in der Troposphäre mit zunehmender Höhe ab. Dieses Verhalten kehrt sich jedoch bei der Tropopause um und es beginnt die Stratosphäre. Die Stratosphäre wiederum enthält die Ozonschicht, die für den Anstieg der Temperatur verantwortlich ist, da sie Teile der solaren UV-Strahlung absorbiert. Am stärksten ist die Absorption in der Stratopause bei einer Höhe von etwa 50 km, was dazu führt, dass sich das Verhalten der Temperatur erneut ändert und mit steigender Höhe die Temperatur wieder sinkt. Die anschließende Mesosphäre, die bis zu einer Höhe von 90 km reicht, endet mit einem Temperaturminimum, dem ein rascher Anstieg der Temperatur folgt, da in den weiteren Höhen die Teile der solaren Strahlung absorbiert werden, die die meiste Energie enthalten. Diese Schicht wird als Thermosphäre bezeichnet und erreicht die sehr hohen Temperaturen durch die Absorption von solarer UV- und EUV-Strahlung. Die äußere Thermosphäre endet schließlich mit dem Übergang zum Weltraum [KELLEY, 2009].

Wie in Abbildung 1 zu sehen, ist die Ionosphäre in der Thermosphäre eingebunden. Weil das neutrale Gas und die ionisierten Teilchen der Ionosphäre miteinander interagieren, handelt es sich um ein gekoppeltes System. Auftretende Interaktionen sind Wechselwirkungen der Thermosphäre mit bestimmten Schichten der Ionosphäre oder komplexe physikalische und chemische Prozesse (zum Beispiel Plasma Bubbles in der äquatorialen Ionosphäre), die beispielsweise in RISHBETH [1971], LÜHR und MAUS [2006] und PARK et al. [2010] beschrieben werden.

Weiterführende Betrachtungen zur Atmosphäre finden sich in der Fachliteratur zum Beispiel in JACOBSON [2005], HEWITT und JACKSON [2007], SAHA [2008] oder ABDU und PANCHEVA [2011].

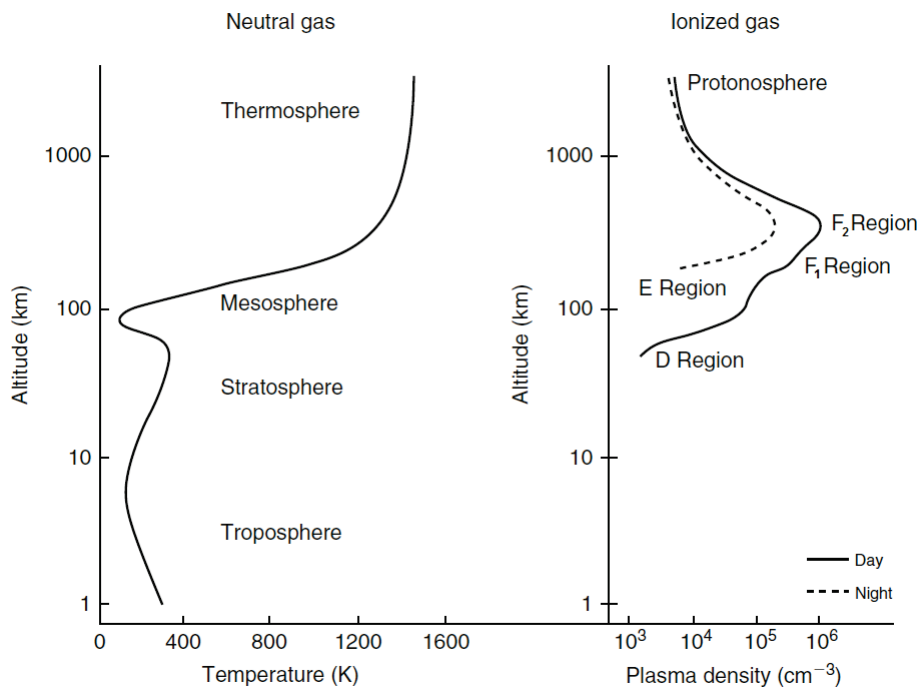


Abbildung 1: Temperaturprofil der Atmosphäre und Plasmadichteprofil der Ionosphäre [KELLEY, 2009]

## 3 Aufbau der Ionosphäre

Die Ionosphäre ist der Bereich der oberen Atmosphäre, der mit teilweise ionisiertem Gas gefüllt ist und die Erde umschließt. So wie sich die Atmosphäre über das Temperaturprofil in Schichten unterteilen lässt, kann mithilfe der Teilchendichte von Plasma eine Unterteilung der Ionosphäre vorgenommen werden. Das Plasma in der Atmosphäre wird gebildet, wenn die Energie der solaren EUV-Strahlung groß genug ist, um eine Ionisation der neutralen Atmosphäre zu bewirken. Wie in Abbildung 1 zu sehen, ergeben sich für Tag und Nacht unterschiedliche Profile in der Teilchendichte des Plasmas. Der Grund hierfür sind die verschiedenen physikalischen Prozesse, die je nach Tageszeit ablaufen.

Tagsüber wird die neutrale Atmosphäre durch die Sonnenstrahlung abhängig von der Stärke der Photoionisation in den verschiedenen Höhen aufgeladen. Die Stärke der Strahlung nimmt mit kleineren Höhen ab, während die Dichte der Atmosphäre stetig ansteigt. Zusätzlich tritt Diffusion auf. Das Profil der resultierenden Plasmadichte hat ein Maximum in der Teilchendichte des Plasmas in der F-Schicht (siehe Abbildung 1). Die Größe des Maximums wird durch die Rekombinationsrate festgelegt, die beschreibt in welchem Maß Ionen und Elektronen zu Atomen oder Molekülen kombiniert werden. Dieser Prozess ist wiederum von der Zusammensetzung des Plasmas abhängig, da die vorliegenden Ionen unterschiedlich mit dem neutralen Gas wechselwirken [KELLEY, 2009].

Ausführliche Betrachtungen der Ionosphäre finden sich in der Fachliteratur, wie zum Beispiel RATCLIFFE [1972], DAVIES [1990], SCHUNK und NAGY [2004], LEMAIRE und GRINGAUZ [2005], BLAUNSTEIN und PLOHOTNIUC [2008] oder KELLEY [2009].

### 3.1 Die Schichten der Ionosphäre

In Abbildung 1 sind auch die verschiedenen Schichten der Ionosphäre dargestellt. Die unterste Region ist die D-Schicht (60 bis 90 km), die sich dadurch auszeichnet, dass die Ionisation in ihr durch die Strahlung der Lyman-Alpha-Spektrallinie ausgelöst wird [SCHUNK und NAGY, 2004]. Diese Strahlung hat eine Wellenlänge von 121 nm und leitet sich von den Spektrallinien des Wasserstoffatoms ab. Die Strahlung wird genau dann emittiert, wenn der Übergang eines Elektrons von der  $n=2$ -Schale auf die  $n=1$ -Schale stattfindet, wobei  $n$  die Hauptquantenzahl ist, die zum Beschreiben des Zustands von Elektronen dient [DRAINE, 2010]. Mit Beginn der Nacht verschwindet die D-Schicht vollständig, da die Rekombinationsrate hoch ist. Die D-Schicht wird von allen Bereichen der Ionosphäre am stärksten durch chemische Prozesse mitbestimmt. Verschiedene moleku-

lare Ionen, neutrale Gase und auch Wasser-Clusterionen spielen dabei eine entscheidende Rolle [BURNS et al., 1991].

Über der D-Schicht folgt die E-Schicht (90 bis 150 km), in der vor allem die weiche Röntgenstrahlung mit einer Wellenlänge von 1 bis 10 nm und ferne UV-Strahlung mit einer Wellenlänge von 100 bis 200 nm die Ionisation verursachen.

Die oberste Region der Ionosphäre ist die F-Schicht (150 bis 500 km), in der die EUV-Strahlung mit Wellenlängen von 10 bis 100 nm Hauptgrund für die Ionisation ist. Die F-Schicht wird aufgrund ihres unterschiedlichen Profils bei Tag und Nacht in die F<sub>1</sub>- und F<sub>2</sub>-Schicht unterteilt. Die F<sub>2</sub>-Schicht enthält dabei das Maximum der Teilchendichte und ist, wie in Abbildung 1 zu sehen, der Bereich, der nachts weniger abnimmt. Die F<sub>1</sub>-Schicht hingegen ist in der Nacht nicht mehr vorhanden. Dieser Effekt wird durch die unterschiedliche Rekombinationsrate in den beiden Regionen bedingt. Im Wesentlichen besteht die F<sub>1</sub>-Schicht aus ionisiertem, atomarem Sauerstoff und wird durch die zugehörige Photoionisation und Reaktionen mit molekularem Sauerstoff und Stickstoff geprägt. Die F<sub>2</sub>-Schicht wird hingegen durch Diffusion, Transportprozesse und windbedingte Strömungen beeinflusst.

## 3.2 Die Zusammensetzung und Balance der Ionosphäre

Die wesentlichen Unterschiede zwischen den Ionosphärenschichten werden durch die ionosphärische Zusammensetzung verursacht, die im folgenden Abschnitt nach KELLEY [2009] hergeleitet wird.

Bis zu einer Höhe von 25 km, also in der Troposphäre, ist die Atmosphäre hauptsächlich aus Stickstoff (etwa 78%) und Sauerstoff (etwa 21%) zusammengesetzt. Das Verhältnis von Stickstoff N<sub>2</sub> und Sauerstoff O<sub>2</sub> bleibt bis zu einer Höhe von 100 km nahezu konstant. Ab etwa dieser Höhe nimmt jedoch der atomare Sauerstoff zu, der dann bei einer Höhe von 120 km in gleichen Mengen wie O<sub>2</sub> vorliegt (siehe Abbildung 2). Die Konzentration des atomaren Sauerstoffs nimmt danach noch weiter zu und ist bei einer Höhe von 250 km größer als die von N<sub>2</sub>. Dieser Aufbau korrespondiert mit der Zusammensetzung des Plasmas in der Ionosphäre. Wie in Abbildung 2 zu erkennen ist, dominiert in der F-Schicht O<sup>+</sup>, während in der D- und E-Schicht hauptsächlich NO<sup>+</sup> und O<sub>2</sub><sup>+</sup> vorliegen.

Die Entstehung dieser Ionen beruht auf verschiedenen Photoionisationsprozessen, welche im Folgenden dargestellt sind.

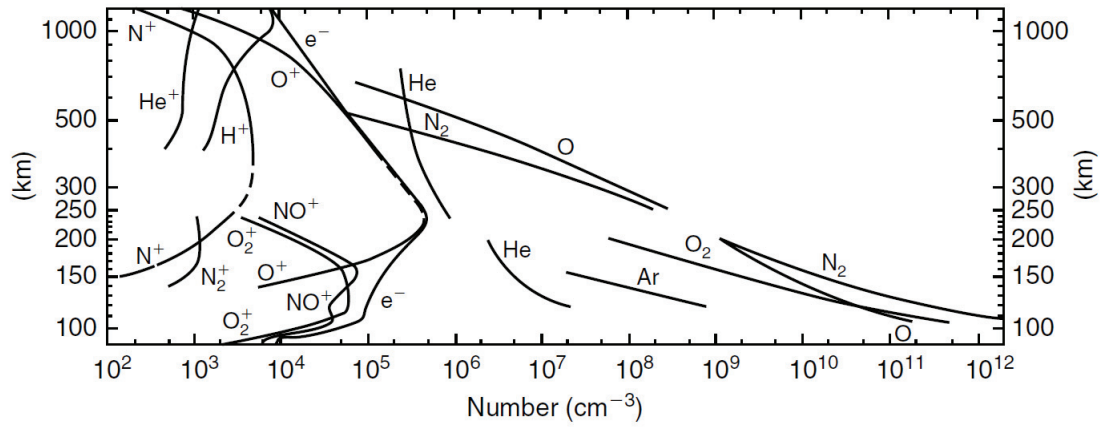


Abbildung 2: Zusammensetzung der Atmosphäre am Tag [KELLEY, 2009]

Photoionisation von molekularem Sauerstoff:



Photoionisation von atomarem Sauerstoff:



Photoionisation von molekularem Stickstoff:



Folgereaktion:



In der Tabelle 1 sind die zugehörigen Ionisierungspotentiale für  $O_2$ ,  $O$  und  $N_2$  aufgelistet. Die Photoionisation eines Gases lässt sich also einem bestimmten Wellenlängenbereich zuordnen.

In noch größeren Höhen (oberhalb der F-Schicht) werden dann Helium- und vor allem Wasserstoff-Ionen, die beim Ladungsaustausch von atomarem Wasserstoff mit  $O^+$  entstehen, die dominierenden Bestandteile des Plasmas:





Gas	eV	nm
O <sub>2</sub>	12.06	102.8
O	13.62	91.03
N <sub>2</sub>	15.58	79.58

Tabelle 1: Ionisierungspotentiale einiger Gase im Grundzustand

In der Nacht verändert sich die Zusammensetzung des Plasmas, da keine neuen Ionen mehr produziert werden. So nimmt besonders die Menge der molekularen Ionen ab, wohingegen die Menge an O<sup>+</sup> fast unverändert bleibt. Der Grund hierfür ist die höhere Rekombinationsrate der molekularen Ionen mit den freien Elektronen. Für die in der D- und E-Schicht vorhandenen Ionen ergeben sich damit folgende Reaktionen – dissoziative Rekombinationen:



Die dissoziative Rekombination von O<sup>+</sup> in der F-Schicht ist nicht relevant:



Stattdessen wird O<sup>+</sup> in zwei Schritten abgebaut. Es findet zunächst ein Ladungsaustausch mit O<sub>2</sub> oder NO<sub>2</sub> statt, der im Anschluss durch die entsprechenden dissoziativen Reaktionen abgeschlossen wird:



Mit diesen Prozessen sind alle wichtigen Reaktionen aufgezeigt, die für eine Balance der Ionosphäre verantwortlich sind. Jedoch können auch andere Ereignisse das Plasma der Ionosphäre beeinflussen. So ist zum Beispiel in nördlichen Regionen die Ionisation durch

das Eindringen von geladenen Teilchen aufgrund der Magnetosphäre zu berücksichtigen. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um Elektronen, die besonders in der E-Schicht die Produktion von Plasma anregen und letztendlich auch zur Emission von Licht führen. Bei den entstehenden Erscheinungen handelt es sich um Polarlichter, welche je nach Nord- oder Südpol unterteilt als Aurora Borealis oder Aurora Australis bezeichnet werden.

## 4 Die solare Strahlung

Da die solare Strahlung die Ionosphäre in ihrer Erscheinung prägt, wird im Folgenden die Sonne und ihre Strahlung — dabei besonders die EUV-Strahlung — diskutiert. Mit diesem Überblick können die in der Ionosphäre ablaufenden Prozesse im Zusammenspiel mit den anderen Objekten und Vorgängen im Sonnensystem gebracht werden.

In der Fachliteratur werden zum Beispiel durch HANSLMEIER [2002], PRÖLSS [2003], SCHERER et al. [2005], DAGLIS [2006], LILENSTEN und BORNAREL [2006], MOLDWIN [2008], DRAINE [2010] tiefgehende Betrachtungen zur solaren Strahlung und ihren Einfluss auf die Erde gegeben.

### 4.1 Die Sonne

Die Sonne als Stern mit ihrem Radius von  $6.96 \cdot 10^5$  km und ihrer Masse von  $1.99 \cdot 10^{30}$  kg macht mehr als 99% der Masse unseres Sonnensystems aus [MOLDWIN, 2008]. Die Sonne besteht zum größten Teil aus Wasserstoff und Helium, wohingegen die schweren Elemente weniger als 2% ausmachen.

Aufgebaut ist die Sonne in schalenförmigen Zonen. Dabei lässt sich grob in Kern, innere und äußere Atmosphäre unterscheiden. Im Zentrum der Sonne wird durch Kernfusion von Wasserstoff zu Helium Energie erzeugt. Diese Energie wird dann über die Strahlungs- und Konvektionszone an die Oberfläche der Sonne transportiert. Während zunächst in der Strahlungszone die Schichtung sehr gleichmäßig und stabil ist, beeinflussen in der Konvektionszone die Rotation und das Magnetfeld der Sonne die Ausbreitung des Wärmestroms. Dies führt zu einer sehr unregelmäßigen Oberfläche, die aus kleinen oder großen Konvektionszellen besteht. Die Zellen sind auf der Sonnenoberfläche als Granulation erkennbar [SCHUNK und NAGY, 2004].

Die Atmosphäre der Sonne unterteilt sich in innere und äußere Atmosphäre. Photosphäre sowie Chromosphäre bilden die innere Atmosphäre und die Korona bildet die äußere Atmosphäre. An die Oberfläche der Sonne schließt die Photosphäre an, welche das sichtbare Licht der Sonne emittiert. Die Photosphäre ist etwa 300 km dick und hat eine Temperatur von etwa 6000 K, die mit zunehmender Höhe abnimmt. Die nächste Zone, die Chromosphäre, beginnt bei einem Minimum der Temperatur und zeichnet sich durch einen starken Anstieg der Temperatur zur äußeren Atmosphäre hin aus. Die Chromosphäre erreicht dabei eine Höhe von etwa 2000 km und hat Temperaturen von etwa 4000 K an der unteren und etwa 10000 K an der oberen Grenze. Im Gegensatz zu den sehr dünnen Schichten der inneren Atmosphäre ist die Korona als äußere Atmosphäre

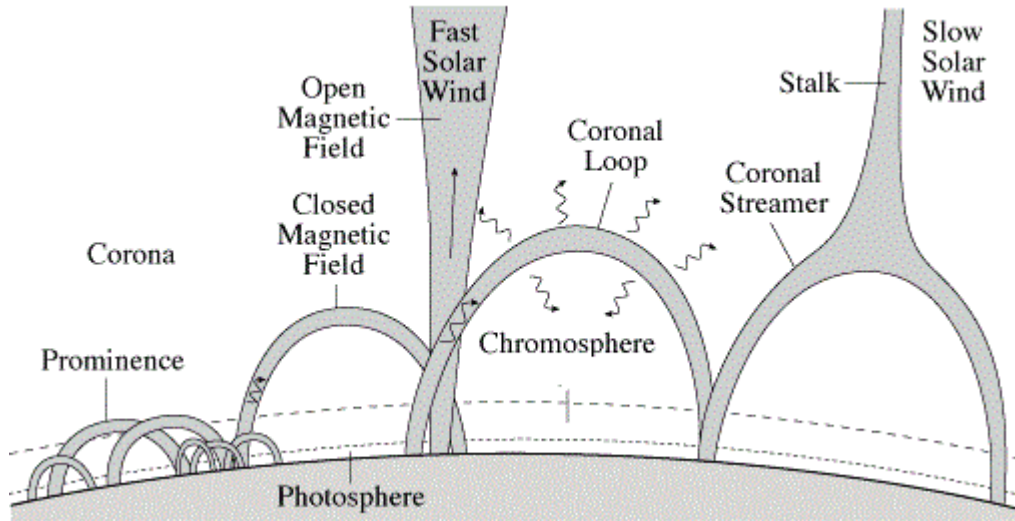


Abbildung 3: Korona der Sonne [LANG, 2010]

sehr weit ausgedehnt, kann über mehrere Sonnenradien reichen und geht fließend in den interplanetaren Raum über. In der Übergangsregion zwischen Chromosphäre und Korona nimmt die Temperatur der Atmosphäre stufenweise zu und erhöht sich dann stark, sodass zum Beispiel in einer Höhe von 5000 km etwa  $10^6$  K möglich sind [EDDY, 1979].

## 4.2 Sonnenwind

Innerhalb der Korona finden verschiedene Wechselwirkungen zwischen dem Plasma und dem magnetischen Feld der Sonne statt. So wird durch die Korona stetig Plasma freigegeben, das sich in alle Richtungen des Sonnensystems ausbreitet. Dieser Vorgang wird als Sonnenwind bezeichnet und beeinflusst das magnetische Feld der Sonne dadurch, dass die magnetischen Feldlinien mit in den Weltraum gezogen werden. Ein anderes Phänomen sind Bögen innerhalb der Korona, die entstehen, wenn das Magnetfeld aus der Sonne bricht und dabei Plasma einschließt. Die koronalen Bögen sind dann die Quelle für starke Emissionen von Röntgenstrahlung. Letztendlich kann das Plasma je nach Stärke des Magnetfeldes entweichen und wird Teil des Sonnenwindes. Dabei gehört es dann jedoch zu den Komponenten, die sich langsam ausbreiten. Besonders schnell breitet sich das Plasma hingegen an Stellen aus, wo die magnetischen Feldlinien geradlinig von der Sonne weg verlaufen. Dies führt zu einem schnellen Abfall der Plasmadichte und Temperatur in den betreffenden Regionen und es entsteht ein koronales Loch. In Abbildung 3 ist das Verhalten innerhalb der Korona zusammengefasst [SCHUNK und NAGY, 2004].

### 4.3 Sonnenflecken und Sonnenfleckenzyklus

In der Photosphäre bewirken das Magnetfeld der Sonne und das vorliegende Plasma Sonnenflecken, die als dunkle Stellen auf der Sonne zu identifizieren sind. Die Ursache für ihr Auftreten ist die unterschiedliche Rotationsdauer der Sonne am Äquator mit 25 Tagen und an den Polen mit 30 Tagen. So treten im grundsätzlich bipolaren Magnetfeld, das insgesamt über einen Zyklus von 22 Jahren schwankt, Verzerrungen auf, die für einige Wochen oder Monate bestehen können. Das magnetische Feld unterdrückt dabei den Zufluss von Energie, sodass Sonnenflecken eine niedrigere Temperatur als ihre Umgebung haben. Die Häufigkeit der Sonnenflecken variiert innerhalb eines Zyklus von durchschnittlich 11 Jahren. Die Länge der Zyklen, wie auch ihr Verlauf, ist dabei unregelmäßig. Bestimmt wird die Häufigkeit durch die Sonnenflecken-Relativzahl, die als Maßzahl für die Sonnenaktivität verwendet werden kann [MOLDWIN, 2008].

### 4.4 Sonneneruptionen und koronale Massenauswürfe

Kommt es oberhalb eines Sonnenflecks zu einer plötzlichen Explosion, bei der während eines hellen Aufleuchtens eine Vielzahl geladener Teilchen in den Weltraum freigegeben wird, spricht man von einer Sonneneruption (siehe Abbildung 4). Bei einer solchen Sonneneruption werden auch UV- und Röntgenstrahlung emittiert, die in allen Regionen der Ionosphäre der Erde eine erhöhte Ionisation verursachen [MOLDWIN, 2008].

Bei koronalen Massenauswürfen werden ebenfalls große Mengen an Plasma in den Weltraum geschleudert. Ein koronaler Massenauswurf kann dabei mit einer Geschwindigkeit freigesetzt werden, welche die des Sonnenwindes übersteigt, weshalb sich eine Schockwelle bilden kann. Beim Durchlaufen des Sonnenwindes kann diese Schockwelle dann weitere geladene Teilchen in großer Menge erzeugen. Trifft ein koronaler Massenauswurf auf die Erde, werden sowohl die Ionosphäre wie auch die Magnetosphäre beeinflusst [MOLDWIN, 2008].

### 4.5 Spektrum der solaren Strahlung

Durch den Sonnenwind und koronale Massenauswürfe werden der Sonne große Mengen an Energie entzogen. Der größte Teil der Energie wird in Form elektromagnetischer Strahlung abgegeben. Die Emission der Sonnenstrahlung ist in der Quantität und Beschaffenheit sehr konstant. So hat die solare Strahlung auf der Erde eine mittlere Leistung pro Fläche von  $1370 \text{ W/m}^2$  — man spricht von der Solarkonstante. Zusammengesetzt ist die Strahlung im Wesentlichen aus infraroten, sichtbaren und ultravioletten Anteilen,

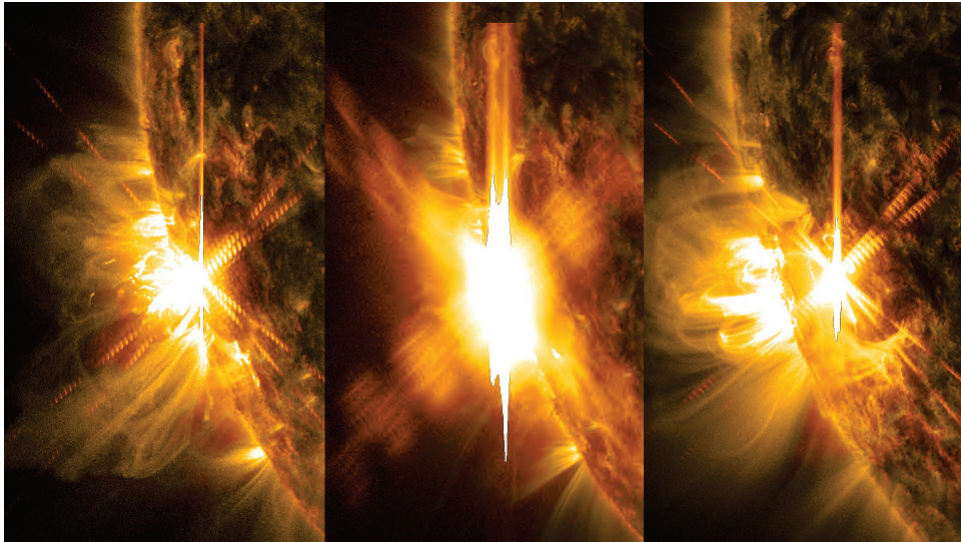


Abbildung 4: Die von SDO aufgezeichneten Bilder zeigen drei Sonneneruptionen, die sich vom 10. bis 11. Juni 2014 ereigneten [NASA, 2014].

die nur geringen Schwankungen unterliegen. Größere Variationen gibt es bei der Radio- und Röntgenstrahlung [SCHUNK und NAGY, 2004]. In Abbildung 5 ist dargestellt, in welchem Maße die verschiedenen Strahlungen auftreten.

Die EUV-Strahlung, die ihren Ursprung in der Korona und Chromosphäre der Sonne hat, macht mit 0.1% einen geringen Anteil an der solaren Strahlung aus [SCHUNK und NAGY, 2004]. Außerdem unterliegt sie im Gegensatz zu anderen Teilen des Sonnenspektrums starken Änderungen. Dies beruht auf dem starken Zusammenhang mit der Sonnenaktivität und damit verbundenen Emissionen von Plasma oder geladenen Teilchen [FG, 2014a].

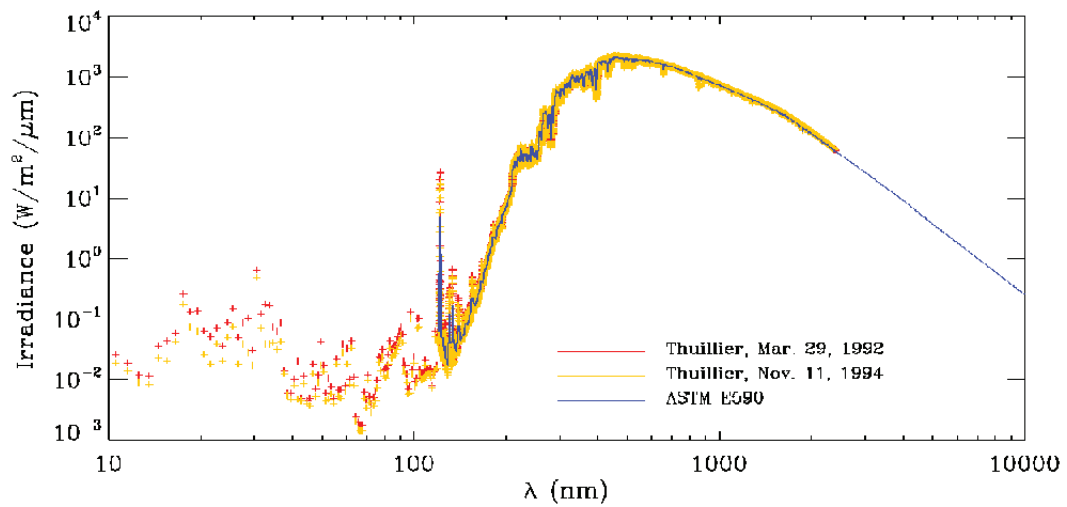


Abbildung 5: Solare spektrale Strahlung: In der Abbildung sind drei Modelle gegenübergestellt, die größtenteils auf Messungen beruhen. Die Achsen sind logarithmisch gewählt, um die schwächere Strahlung bei kleineren Wellenlängen aufzeigen zu können [SDO, 2014].

## 5 Bestimmung der solaren EUV-Strahlung

Die solare EUV-Strahlung ist für verschiedene Forschungs- und Anwendungsbereiche auf der Erde und im Weltraum wichtig und erfordert eine stetige Beobachtung. Derzeit werden mehrere Missionen zur Messung des solaren EUV-Flusses durchgeführt. Im Folgenden werden die Missionen SolACES, SDO (EVE), PROBA2 (LYRA) und GOES vorgestellt und miteinander verglichen, um festzustellen, ob sie für die Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Reaktion der Ionosphäre auf EUV-Strahlung geeignet sind. Dazu müssen die jeweiligen Daten große Bereiche des EUV-Spektrums mit hoher zeitlicher sowie spektraler Auflösung über einen langen Zeitraum enthalten.

Die Messung der EUV-Strahlung unterliegt verschiedenen Rahmenbedingungen. Zunächst kann die Messung nur oberhalb der Atmosphäre erfolgen, da die EUV-Strahlung durch die Absorption innerhalb der Atmosphäre nicht die Erdoberfläche erreicht. Ein weiteres Problem ist die Abnutzung von optischen Systemen durch den Einfluss energiereicher Photonen. Dies führt bei langer Betriebsdauer der Messgeräte zu Abweichungen bei der Bestimmung des EUV-Flusses [ROTTMAN et al., 2013].

Die Instrumente müssen also im Weltraum platziert werden. Dies geschah anfangs durch Experimente mit Forschungsraketen [DETWILER et al., 1961]. Mit den ersten Satelliten, die in der Lage waren, die Bestrahlungsstärke der Sonne zu messen, wurden neben den Erkenntnissen zu den zyklischen und kurzweiligen Änderungen der Sonnenstrahlung auch Probleme der Instrumente erkannt, die sich bei längeren Missionen auf die Qualität der Daten auswirken würden. Zu den frühen Satellitenmissionen gehört beispielsweise die Orbiting Solar Observatory Serie der NASA, die über eine Zeit von 11 Jahren die Sonne im UV- und Röntgenlicht beobachtet hat. Die Ergebnisse führten zum Erproben neuer Instrumente und Verfahren wie der On-Board-Kalibrierung, die eine Korrektur von Messdaten ermöglicht. Es folgten mehrere Missionen; daher war ab den 80-er Jahren eine kontinuierliche Beobachtung der Sonnenaktivität gegeben. Der Solar Mesosphere Explorer mit dem Instrument Solar Ultraviolet Irradiance Monitor, Nimbus-7 und verschiedene NOAA-Wettersatelliten mit dem Solar Backscatter Ultraviolet Instrument sowie der European Remote Sensing Satellit mit dem Global Ozone Monitoring Experiment sind Beispiele für vergangene Missionen, die über längere Zeiträume Daten für die UV- und sichtbare Strahlung gesammelt haben [ROTTMAN et al., 2013]. Eine der ersten Missionen mit dem Ziel der Bestimmung der EUV-Strahlung ist das Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics Projekt mit dem Solar EUV Experiment (SEE). SEE beobachtet die Sonne nun bereits seit 2002 in einem Wellenlän-



genbereich von 1 bis 194 nm und hat Genauigkeiten von 10 bis 20% erreicht, was durch neue Kalibrationsverfahren möglich ist (Pre- und In-Flight Kalibration). Die Mission verfolgt damit das Ziel, eine Datenbasis für einen großen Zeitraum zu schaffen [WOODS et al., 2005].

## 5.1 SolACES

Das wissenschaftliche Instrumentenpaket SOLAR, das am Columbus-Raumlabor der Internationalen Raumstation (ISS) angebracht ist, umfasst drei Instrumente: Solar Variations and Irradiance Monitor (SOVIM), Solar Spectral irradiance measurements (SOLSPEC) und Auto-calibrating Extreme Ultraviolet and Ultraviolet spectrometers (SolACES). Alle drei Instrumente sind auf dem Coarse Pointing Device (CPD) angebracht, das die Bewegungen der ISS ausgleicht und damit eine ununterbrochene Ausrichtung auf die Sonne ermöglicht. Dies erlaubt es SolACES seit dem Februar 2008 kontinuierlich die Sonne zu beobachten. Hierbei werden Wellenlängen von 17 bis 220 nm bei einer spektralen Auflösung von 0.5 bis 2 nm betrachtet. Eine Besonderheit von SolACES ist die Auto-Kalibration, die regelmäßig durchgeführt wird, um die Veränderungen des Wirkungsgrades des Instrumentes zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen ermöglicht eine hohe radiometrische Genauigkeit von 10% [GROTHUES, 2013b].

Neben der kontinuierlichen Überwachung der solaren EUV/UV-Strahlung hat SolACES noch weitere wissenschaftliche Ziele. Dazu gehören die Modellierung des spektralen EUV/UV-Strahlungsstromes der Sonne, die Modellierung der irdischen Thermosphäre und Ionosphäre, die Bestimmung von solaren EUV/UV-Indizes und die Erforschung der solar-terrestrischen Beziehungen [GROTHUES, 2013a].

Zum Messen der EUV/UV-Strahlung verwendet SolACES zwei Doppel-Spektrophotometer. Diese bestehen aus Beugungsgittern und Channel-Elektronenvervielfachern als Detektoren sowie Ionisationskammern mit Photodioden. Zur Durchführung der Auto-Kalibration gibt es ein gemeinsames Filterrad, mit dem während der Prozedur die entsprechenden Bänder ausgewählt werden können (siehe Abbildung 6). Die Messungen selbst erfolgen ohne Einsatz der Filter. Die Auto-Kalibration wird in regelmäßigen Abständen durchgeführt. Dabei wird durch Spektrometermessungen mit und ohne Filter die Transmission der Filter bestimmt und mithilfe der Ionisationskammermessungen der absolute EUV/UV-Fluss abgeleitet. Durch diese Beobachtungen können dann Kalibrationsfaktoren bestimmt werden, die auf die folgenden Messungen angewendet werden [GROTHUES, 2013b].

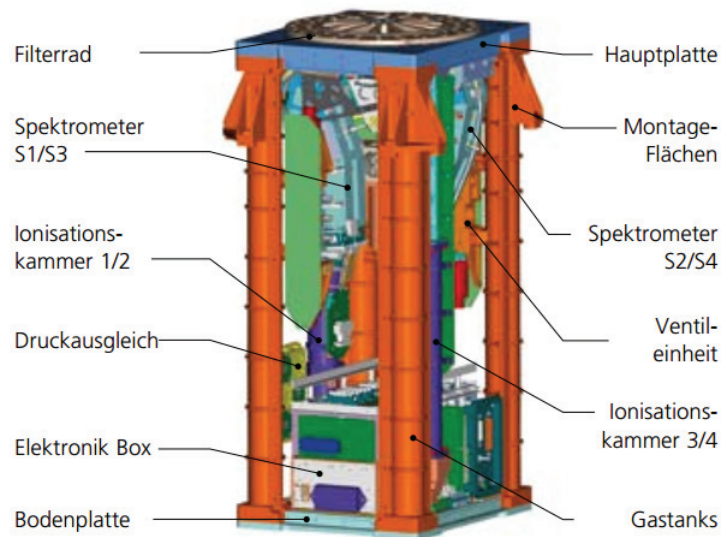


Abbildung 6: Anordnung von SolACES Komponenten [FG, 2014b]

## 5.2 SDO (EVE)

Das Solar Dynamics Observatory (SDO) wurde als erste Mission des Programms Living With a Star (LWS) der NASA gestartet und soll helfen, die Veränderungen der Sonne und ihren Einfluss auf die Erde zu verstehen. Ausgestattet ist SDO mit den Instrumenten: Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE), Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) und Atmospheric Imaging Assembly (AIA). Die Aufgabe von EVE ist die Messung der EUV-Strahlung in einem Wellenlängenbereich von 0.1 bis 105 nm bei einer spektralen Auflösung von 0.1 nm. Die Genauigkeit von EVE bei der Bestimmung der solaren EUV-Strahlung ist besser als 25% und wird durch Kalibrierungen während der Mission erreicht [LASP, 2013b].

Die SDO Mission hat verschiedene Ziele, welche stark von dem jeweiligen Instrument abhängen. So soll durch HMI im Wesentlichen ein Verständnis über das Innere der Sonne und magnetische Aktivitäten erlangt werden. Mithilfe von AIA sollen die Vorgänge in der Atmosphäre der Sonne untersucht werden, die beispielsweise dann auch das Welt- raumwetter beeinflussen. EVE dient hingegen der Überwachung des EUV-Flusses und der Erforschung, wie die Veränderungen im EUV-Fluss zustande kommen. Letztendlich soll durch EVE auch die Vorhersage von Änderungen in der solaren EUV-Strahlung möglich sein und ein besseres Verständnis für die Auswirkungen auf die technologische Infrastruktur geschaffen werden [LASP, 2013b].

Das Instrument EVE besteht insgesamt aus drei Komponenten, die Messungen durch-

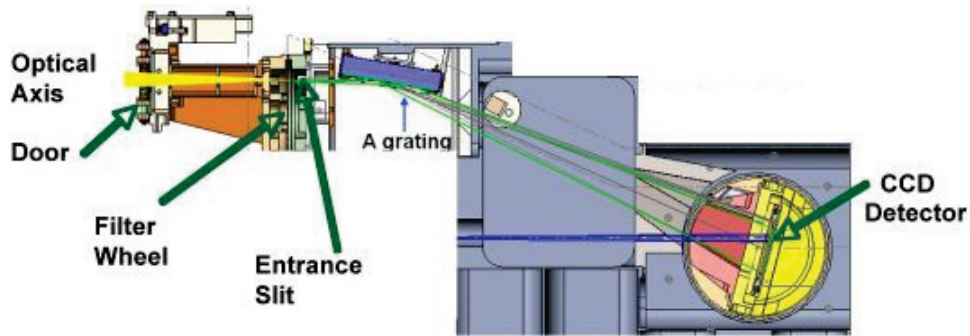


Abbildung 7: Aufbau MEGS-A [LASP, 2013a]

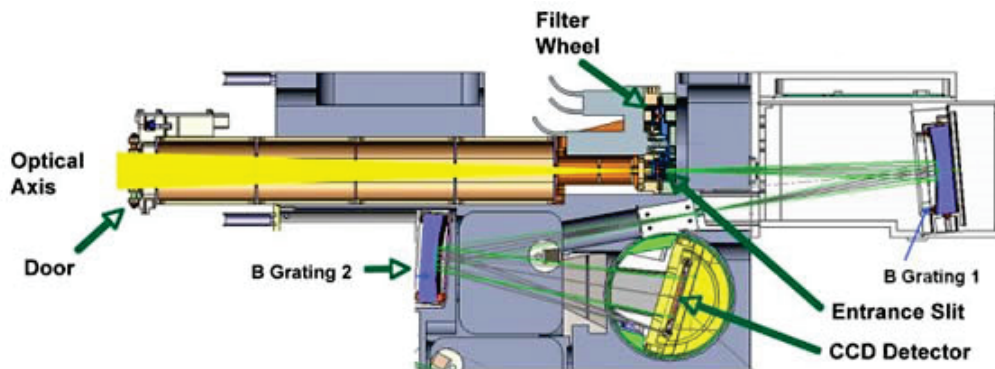


Abbildung 8: Aufbau MEGS-B [LASP, 2013a]

führen und koordinieren. Der Multiple EUV Grating Spectrograph (MEGS) besteht aus zwei Gitterspektrografen mit Rowland-Kreis, die im Wellenlängenbereich von 5 bis 105 nm messen. MEGS besitzt vier Kanäle: MEGS-A mit einem Gitterspektrografen und streifenden Einfall für 5 bis 37 nm, MEGS-B mit einem Gitterspektrografen und senkrechten Einfall für 35 bis 105 nm, MEGS-SAM mit einer Lochkamera, die zusammen mit den Sensoren von MEGS-A einzelne Röntgenstrahlen erfasst, für 0.1 bis 7 nm und MEGS-P eine Photodiode, die mit dem ersten Gitter von MEGS-B arbeitet, für die Lyman-Alpha-Spektrallinie. Die zweite Komponente ist der EUV SpectroPhotometer (ESP), der vier Bänder in den Wellenlängenbereichen von 17 bis 38 nm und 0.1 bis 7 nm für die nullte Ordnung misst. EPS liefert damit Kalibrierungen für MEGS. Die letzte Komponente ist die EVE Electronics Box (EEB), die MEGS und ESP kontrolliert und eine Schnittstelle für den Zugriff auf SDO liefert (siehe Abbildung 7 und Abbildung 8) [LASP, 2013a].

## 5.3 PROBA2 (LYRA)

PROBA2 ist ein Mikrosatellit der European Space Agency (ESA) und knüpft an die erfolgreiche Mission PROBA1 an. Das Project for Onboard Autonomy (PROBA) enthält vier Instrumente. Der Large Yield Radiometer (LYRA) und der Sun Watcher using Active Pixel System detector and Image Processing (SWAP) sind die Instrumente, welche zur Beobachtung der Sonne dienen. Die Thermal Plasma Measurement Unit und die Dual Segmented Langmuir Probe untersuchen hingegen die nähere Umgebung des Flugkörpers. Für die Messung der EUV-Strahlung ist LYRA zuständig, wobei vier Kanäle beobachtet werden, die verschiedene Wellenlängenbereiche abdecken [ROB, 2014b].

Ziel von PROBA2 ist die Untersuchung der Entstehung und Entwicklung von Ereignissen, die das Weltraumwetter beeinflussen. Solche Ereignisse können koronale Massenauswürfe, Sonneneruptionen oder Veränderungen in der EUV-Strahlung sein [ROB, 2014b].

Gemessen wird von LYRA mit drei Einheiten, die alle vier Kanäle besitzen: Kanal für die Lyman-Alpha-Spektrallinie für 120 bis 123 nm, der Herzberg-Continuum-Kanal für 190 bis 222 nm, der Aluminiumfilterkanal für 17 bis 80 nm und der Zirkoniumfilterkanal für 6 bis 20 nm. Der Unterschied in den drei Einheiten liegt in den Detektoren. So ist die erste Einheit mit Diamantendetektoren ausgestattet und nicht wie die anderen mit einer Mischung aus Diamanten- und Siliziumdetektoren. Aus diesem Grund wird durch die erste Einheit das stetige Messen durchgeführt, wohingegen die anderen für Kalibrierung genutzt werden [ROB, 2014a].

## 5.4 GOES

Seit Oktober 1974 werden kontinuierlich Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES) Missionen durchgeführt, die alle das Instrument Space Environment Monitor (SEM) an Bord hatten, das mit Magnetometer, X-ray Sensor (XRS) und Energetic Particle Sensor (EPS) ausgestattet ist. Angefangen mit GOES-13 von 2006 bis zur letzten Mission GOES-15 von 2010 wurden Extreme Ultraviolet Sensors (EUVS) eingeführt, die fünf Bänder zwischen 5 und 127 nm messen [NGDC, 2014]. Im Moment werden für drei Bänder kalibrierte Daten bereitgestellt: A für 5 bis 15 nm, B für 25 bis 35 nm und E für 115 bis 130 nm [MACHOL et al., 2014].

Die GOES Missionen sind ein wichtiger Bestandteil des National Space Weather Program der USA und helfen dabei, zeitlich verlässliche Beobachtungen und Vorhersagen zum erdnahen Weltraum zu machen [NGDC, 2014].

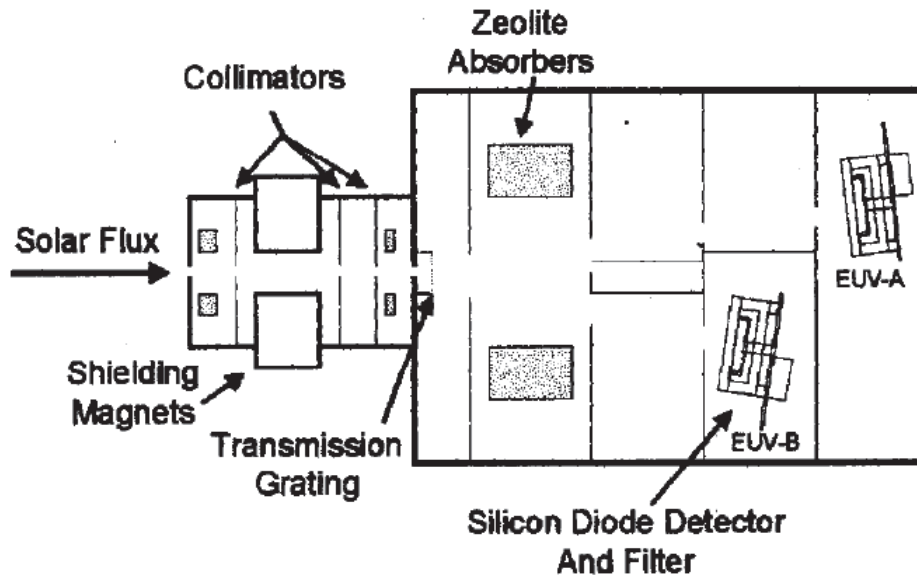


Abbildung 9: Aufbau eines EUVS [VIERECK und HANSER, 2000]

Die verschiedenen Bänder von EUVS werden mithilfe eines Transmissionsgitters ausgewählt und auf die Siliziumdetektoren gelenkt, die mithilfe von angebrachten Filtern vor Störlicht geschützt werden. Insgesamt verfügt EUVS über drei Gehäuse, die eine solche Anordnung enthalten und jeweils die Messung von einem oder zwei der Bänder ermöglichen. Weiterhin teilt sich EUVS mit XRS Teile der Elektronik, weshalb beide Instrumente als eine Einheit verbaut sind (siehe Abbildung 9). Das kombinierte Instrument XRS/EUVS ist so am GOES Satelliten angebracht, dass es immer auf die Sonne ausgerichtet ist und damit kontinuierlich den EUV-Fluss messen kann [NGDC, 2014].

## 5.5 Gegenüberstellung

Für die Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Reaktion der Ionosphäre auf EUV-Strahlung sind die Daten der vorgestellten Missionen unterschiedlich gut geeignet. In der Tabelle 2 ist zusammengefasst, wie sich die Daten der Missionen unterscheiden.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass unterschiedliche Genauigkeiten vorliegen und Detektoren je nach Art und Lebensdauer durch Degradation beeinträchtigt werden. So wirkt sich zum Beispiel die starke Degradation der zweiten Einheit von LYRA auf den Kanal der Lyman-Alpha-Spektrallinie und den Herzberg-Continuum-Kanal aus, wodurch sich ein sehr kleines Signal-Untergrund-Verhältnis ergibt. Dadurch lassen sich nur noch sehr schwer solare Effekte im Signal erkennen. In Abbildung 10 ist aufgezeigt, wie sich die

Mission	Spektrale Bereiche	Spektrale Aufl.	Zeitliche Aufl.
SolACES	17 - 220 nm	0.5 - 2 nm	1 Tag
SDO(EVE)	0.1 - 105 nm	0.1 nm	1 Tag
PROBA2(LYRA)	6 - 20 nm 17 - 80 nm 120 - 123 nm 190 - 222 nm	-	1 Minute
GOES	5 - 15 nm 25 - 35 nm 115 - 130 nm	-	1 Minute

Tabelle 2: Vergleich von SolACES, SDO(EVE), PROBA2(LYRA), GOES

Daten des Kanals für die Lyman-Alpha-Spektrallinie in GOES und LYRA unterscheiden. Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 11, dass sich beispielsweise GOES im Band B und EVE für 25 bis 34 nm ähnlich sind.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Daten von GOES am besten für die angestrebten Untersuchungen geeignet sind, da sie für einen großen Zeitraum vorliegen und eine hohe zeitliche Auflösung haben. Die Daten von Lyra sind nur bedingt geeignet, da einige Kanäle Probleme haben und zum Teil keine Vollständigkeit gegeben ist. Die Daten von EVE haben für weitere Untersuchungen ebenfalls nur eingeschränkten Nutzen, da die zeitliche Auflösung nicht ausreichend ist. Jedoch können die Daten von EVE zum Vergleich mit bestimmten Kanälen von LYRA und GOES angewendet werden, um deren Qualität in ausgewählten Zeiträumen einschätzen zu können. Die SolACES-Daten haben ebenfalls eine unzureichende zeitliche Auflösung und eignen sich daher nicht für die Analyse.

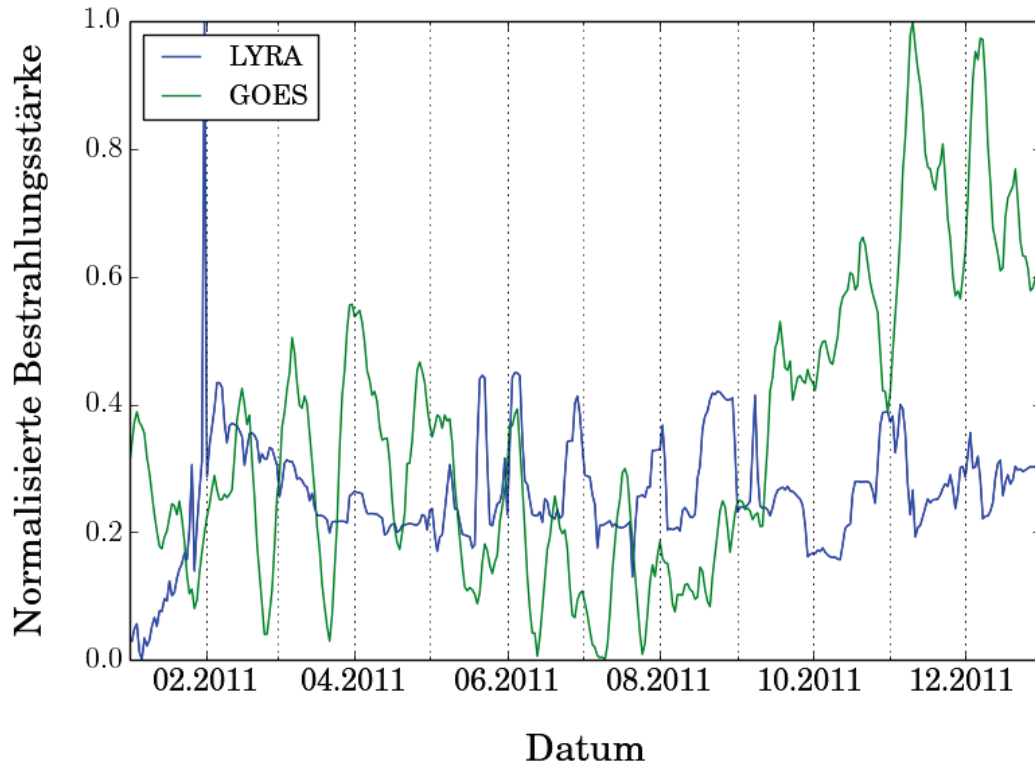


Abbildung 10: Kanal für die Lyman-Alpha-Spektrallinie in GOES und LYRA von Januar bis Dezember 2011. Für die Darstellung wurden die täglichen Mittelwerte für beide Datensätze bestimmt. Der normalisierte Verlauf beider Signale zeigt, dass sich GOES- und LYRA-Daten stark unterscheiden. Die Ursache hierfür ist die starke Degradation der zweiten Einheit von LYRA auf den Kanal der Lyman-Alpha-Spektrallinie und den Herzberg-Continuum-Kanal.

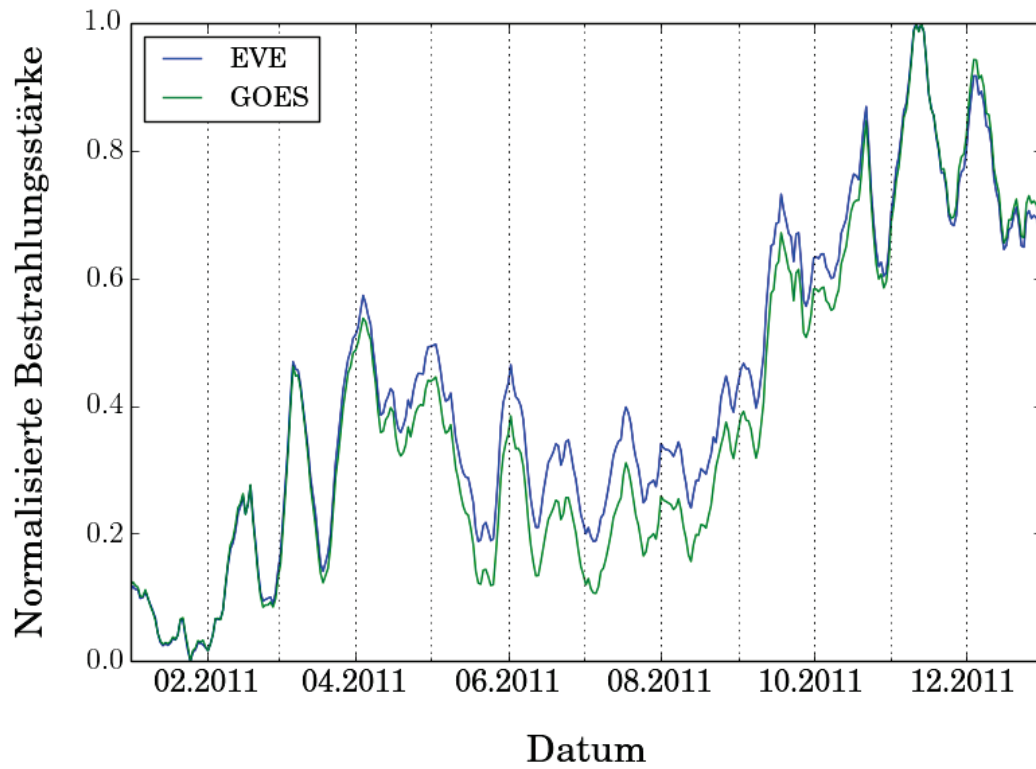


Abbildung 11: GOES im Band B und SDO(EVE) für 25 bis 35 nm von Januar bis Dezember 2011. Für die Darstellung wurden die täglichen Mittelwerte für die GOES-Daten bestimmt. Der normalisierte Verlauf beider Signale zeigt, dass GOES- und EVE-Daten gut übereinstimmen.



## 6 Einfluss der solaren Strahlung auf die Ionosphäre

Der konkrete Einfluss der solaren EUV-Strahlung auf die Atmosphäre hängt von verschiedenen Faktoren ab. Zum Beispiel wird durch die Wellenlänge bestimmt, welche Prozesse ausgelöst werden: Ionisation bei kleinen Wellenlängen und Dissoziation bei großen Wellenlängen. Das Ergebnis der Reaktionen wird wiederum durch den Wirkungsquerschnitt, also der Wahrscheinlichkeit, dass die einfallende Strahlung und ein Teilchen wechselwirken, und die vorliegenden Teilchen beeinflusst. In jedem Fall wird durch die einfallende Strahlung eine Kette von Vorgängen ausgelöst (siehe Abbildung 12), die sich auf thermale Struktur der Atmosphäre und das Plasma der Ionosphäre auswirkt [SCHUNK und NAGY, 2004].

### 6.1 Die Absorption solarer Strahlung

Im folgenden Abschnitt wird die Absorption solarer Strahlung nach SCHUNK und NAGY [2004] hergeleitet.

Die Absorption von solarer EUV-Strahlung ist der dominante Prozess in der Thermosphäre, wie zum Beispiel in ROBLE et al. [1987] und FULLER-ROWELL et al. [2013] aufgezeigt. Unter den Annahmen, dass nur eine Wellenlänge  $\lambda$  vorliegt, dass nur eine Art von Teilchen beteiligt ist, deren Dichte  $n$  mit der Höhe  $H$  exponentiell abnimmt, und dass die Erdoberfläche eine horizontale Ebene ist, kann die Abnahme des Photonenflusses folgendermaßen beschrieben werden

$$dI(s_\lambda) = -I(s_\lambda)n(z)\sigma^a ds_\lambda. \quad (11)$$

Die Absorption eines Photons, das sich durch die Atmosphäre bewegt, wird also durch Wirkungsquerschnitt  $\sigma^a$ , den Photonenfluss  $I(s_\lambda)$  und die neutrale Dichte  $n(z)$  bestimmt, die abhängig von der Länge des Pfades  $s_\lambda$  und der Höhe  $z$  sind. Durch die Annahme einer ebenen Oberfläche kann die Änderung entlang des Pfades mithilfe der Höhe  $z$  und den solaren Zenit  $\chi$  beschrieben werden

$$ds_\lambda = -dz \sec \chi. \quad (12)$$

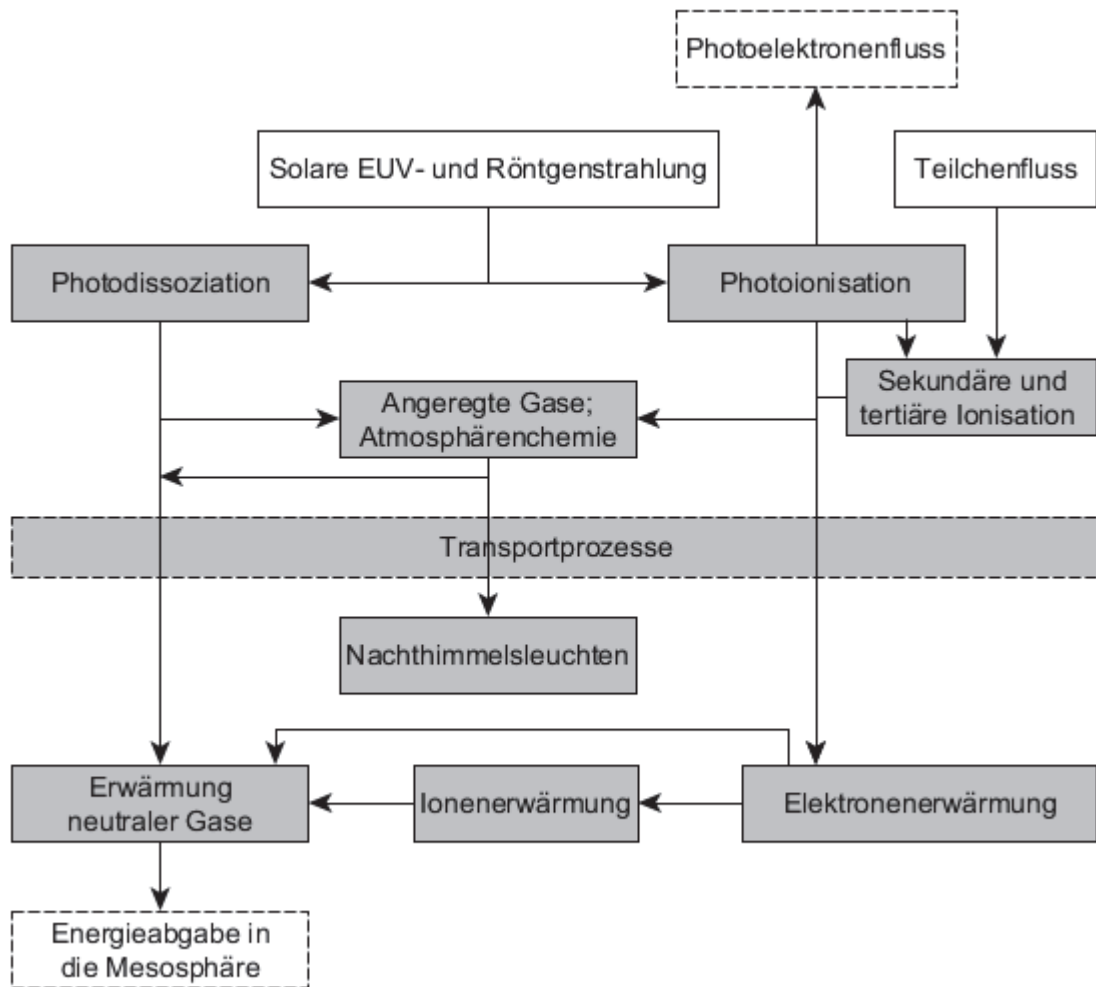


Abbildung 12: Die einfallende solare Strahlung und der Teilchenfluss lösen Ionisations- und Dissoziationsprozesse in der Ionosphäre aus, die zu einer Vielzahl weiterer Prozesse führen und letztendlich auch andere Bereiche der Atmosphäre beeinflussen. Nach [SCHUNK und NAGY, 2004].

Die Abnahme der neutralen Dichte  $n(z)$  zu einer Referenzhöhe  $z_0$  ist durch folgende Gleichung gegeben

$$n(z) = n(z_0) \exp \left[ -\frac{z - z_0}{H} \right]. \quad (13)$$

Die Intensität des Photonenflusses ergibt sich durch

$$I(z, \chi) = I_\infty \exp [-Hn(z)\sigma^a \sec \chi]. \quad (14)$$

Mit  $I_\infty$  wird der unverminderte Photonenfluss oberhalb der Atmosphäre ausgedrückt. In der Realität treten die getroffenen Annahmen jedoch nicht auf, weshalb die Gleichungen dahingehend modifiziert werden müssen. Dichte und der Wirkungsquerschnitt werden von der Art  $s$  der beteiligten Teilchen bestimmt. Der Wirkungsquerschnitt ist von der Wellenlänge abhängig. Berücksichtigt man diese Änderungen ergeben sich folgende Gleichungen

$$dI(z, \lambda, \chi) = - \sum_s n_s(z) \sigma_s^a(\lambda) I(z, \lambda) ds_\lambda, \quad (15)$$

$$I(z, \lambda, \chi) = I_\infty(\lambda) \exp \left[ - \int_\infty^z \sum_s n_s(z) \sigma_s^a(\lambda) ds_\lambda \right]. \quad (16)$$

Der Exponent in Gleichung 16 wird als optische Tiefe  $\tau$  bezeichnet und kann nur durch ein umfassendes Wissen über die Dichteverteilung in der Atmosphäre bestimmt werden. Mithilfe der Gleichung 13 kann hierfür die vertikale Massenbelegung hergeleitet werden

$$\int_{z_0}^\infty n_s(z) dz = n_s(z_0) H_s(z_0). \quad (17)$$

Die optische Tiefe wird wie folgt beschrieben

$$\tau(z, \lambda, \chi) = \sec \chi \sum_s n_s(z) \sigma_s^a(\lambda) H_s. \quad (18)$$

Die Annahme einer ebenen Oberfläche (siehe Gleichung 12) funktioniert für Winkel bis  $75^\circ$  und muss erst bei größeren Winkeln durch das kompliziertere Verfahren mit der sogenannten Chapman-Funktion  $Ch(z_0, x_0)$  ersetzt werden. Diese Funktion ist von

Höhe und Zenit abhängig und erlaubt die Beschreibung der Massenbelegung bei einer gekrümmten Oberfläche und der unterschiedlichen Dichteverteilungen je nach Winkel

$$\int_{z_0}^{\infty} n_s(z) ds_{\lambda} = n_s(z_0) H_s(z_0) Ch(z_0, x_0). \quad (19)$$

## 6.2 Photoionisation

Im folgenden Abschnitt wird die Photoionisation nach SCHUNK und NAGY [2004] hergeleitet. Eine Betrachtung der Photoionisation für die verschiedenen Gase ist zum Beispiel in REES [1989] gegeben.

Die Produktion freier Elektronen im neutralen Gas der Atmosphäre wird durch die Photoionisation verursacht. Die Energie der Strahlung geht dabei im Wesentlichen an die Elektronen, da die Ionen größere Massen haben und deshalb wenig Rückstoßenergie bei der Photoionisation erhalten. In vereinfachter Form und bei den gleichen Annahmen wie für Gleichung 14 lässt sich die Entstehung eines Elektron-Ion-Paares bei der Absorption eines Photons folgendermaßen beschreiben — Chapman-Produktions-Funktion

$$P_c(z, \chi) = I(z, \chi) \eta \sigma^a n(z) = I_{\infty} \exp[-Hn(z)\sigma^a \sec \chi] \eta \sigma^a n(z). \quad (20)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Elektron-Ion-Paar bildet, ist mit  $\eta$  gegeben. Die Gleichung zeigt auf, dass die Photoionisationsrate proportional zum Produkt von Photonenfluss und Dichte des neutralen Gases ist. Mit zunehmender Höhe nimmt die Dichte ab und der Photonenfluss hingegen zu. Hieraus resultiert ein Maximum für die Photoionisationsrate, das sich in Abhängigkeit von der Höhe folgendermaßen darstellen lässt

$$z_{max} = z_0 + H \ln [n(z_0) H \sigma^a \sec \chi]. \quad (21)$$

Die maximale Produktionsrate wird mit Gleichung 20 und Gleichung 21 formuliert

$$P_c(z_{max}, \chi) = \frac{I_{\infty} \eta \cos \chi}{H \exp(+1)}. \quad (22)$$

Für Berechnungen realitätsnaher Ergebnisse müssen neben der Höhe, Energie und dem Einfallswinkel der Strahlung noch weitere Faktoren berücksichtigt werden. Durch den Endzustand eines Ions und die Energie des eintreffenden Photons wird bestimmt, wie viel Energie beim Wechselwirken umgesetzt wird. Der Wirkungsquerschnitt hängt also

von Wellenlänge und Art des vorliegenden Teilchens  $i$  ab. Der Wirkungsquerschnitt für alle möglichen Zustände der Ionen wird hingegen mit der Zerfallsbreite  $p_s$  und dem absoluten Wirkungsquerschnitt bestimmt. Die Zerfallsbreite selbst ist von dem Energieniveau  $E_l$  der Ionen und den korrespondierenden Wellenlängen abhängig. Durch das Summieren für alle beteiligten Teilchen und Ionenzustände ergibt sich die Photoelektronen-Produktionsrate

$$P_c(E, z, \chi) = \sum_l \sum_s n_s(z) \int_0^{\lambda_{si}} I_\infty(\lambda) \exp[-\tau(\lambda, \chi, z)] \sigma_s^i(\lambda) p_s(\lambda, E_l) d\lambda. \quad (23)$$

Als Vereinfachung für die Produktionsrate einer Art von Teilchen ergibt sich

$$P_{ts}(z, \chi) = n_s(z) \int_0^{\lambda_{si}} I_\infty(\lambda) \exp[-\tau(\lambda, \chi, z)] \sigma_s^i(\lambda) d\lambda. \quad (24)$$

Mit der Gleichung 24 können die absoluten Produktionsraten bestimmter Ionen berechnet werden. In Abbildung 13 sind beispielsweise die Photoionisationsraten für jene Atome und Moleküle aufgezeigt, die hauptsächlich mit der EUV-Strahlung wechselwirken.

### 6.3 Photodissoziation

Wird ein Molekül von einem Photon getroffen, kann das Molekül auseinanderbrechen. Diese Photodissoziation ist ein wichtiger chemischer Prozess in der Atmosphäre, der durch Photonen des sichtbaren Lichts aber vor allem durch UV-Strahlung ausgelöst wird. Die Bindung eines bestimmten Moleküls zu trennen, erfordert eine spezifische Menge an Energie, die zum Beispiel beim molekularen Stickstoff größer ist als beim molekularen Sauerstoff.

Das dominierende Gas der Thermosphäre, also der atomare Sauerstoff, wird durch Photodissoziation des molekularen Sauerstoffes in einer Höhe von 200 km gebildet. Das Dissoziationspotential von Sauerstoff ist 5.12 eV und entspricht einer Wellenlänge von weniger als etwa 240 nm. Die Photodissoziation von Sauerstoff findet im Wesentlichen durch Photonen im Wellenlängenbereich des Schumann-Runge-Kontinuums bei 135 bis 176 nm statt. Ab einer Wellenlänge von 65 nm findet keine Photodissoziation von Sauerstoff mehr statt, da die Absorption von Photonen fast ausschließlich Ionisation bewirkt. Die Photodissoziation von molekularem Stickstoff unterscheidet sich dadurch, dass die Stickstoffmoleküle vor der eigentlichen Dissoziation verschiedene angeregte Zustände annehmen. Diese Photodissoziation der Stickstoffmoleküle wird von Photonen im Wellen-

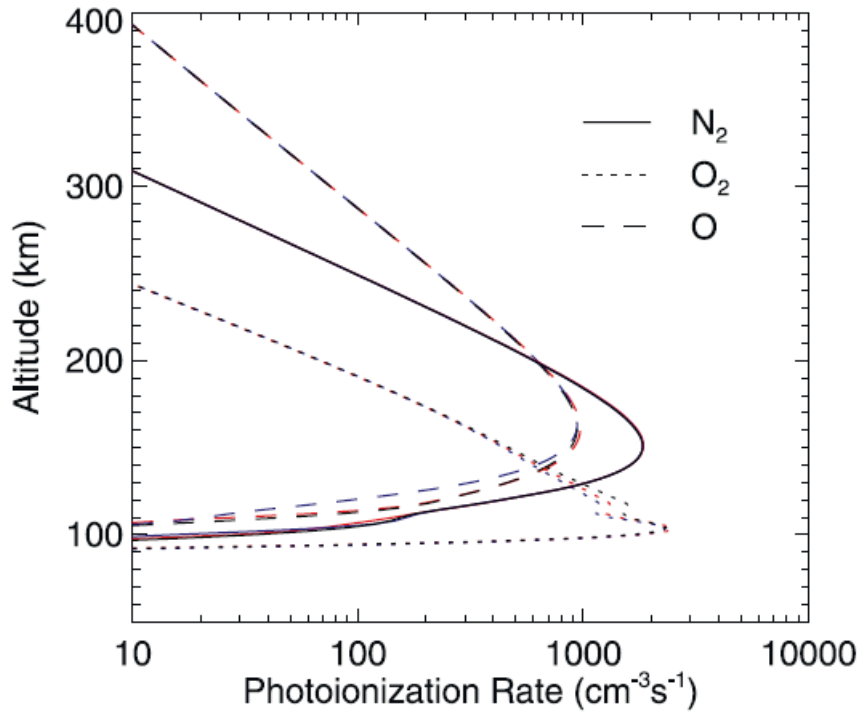


Abbildung 13: Photoionisationsraten der Gase, die hauptsächlich von der solaren EUV-Strahlung ionisiert werden (durchgezogene Linie:  $\text{N}_2$ , gestrichelte Linie:  $\text{O}$ , gepunktete Linie:  $\text{O}_2$ ; schwarz: hochaufgelöstes Spektrum nach HINTEREGGER et al. [1981], blau: Spektrum nach TORR et al. [1979], rot: Spektrum nach SOLOMON und QIAN [2005]). Die Photoionisationsraten gelten für einen kleinen Zenitwinkel [SOLOMON und QIAN, 2005].

längenbereich von 80 bis 100 nm ausgelöst; das Dissoziationspotential schließt also direkt an das Ionisationspotential an [REES, 1989].

## 6.4 Änderungen der Ionosphäre durch solare Aktivität

Im Folgenden werden nach KUTIEV et al. [2013] die mittel- und langfristigen Änderungen der Ionosphäre sowie die Änderungen während geomagnetischer Stürme erläutert.

Den größten Einfluss auf die obere Atmosphäre der Erde hat der 27-Tage-Rotationszyklus der Sonne, der bereits in sehr frühen Arbeiten wie MAUNDER [1904] und BARTELS [1934] untersucht wurde. Sonnenwind und EUV-Strahlung sind hierbei die Hauptfaktoren für die auftretenden Veränderungen in der neutralen Atmosphäre und der Ionosphäre. Die EUV-Strahlung wirkt sich dabei auf die Ionenproduktionen und die Temperatur aus. Durch Prozesse wie zum Beispiel Hochgeschwindigkeits-Sonnenwinde aus koronalen Löchern, die länger als eine Sonnenrotation wirken können, wird der 27-Tage-Zyklus auch in die Atmosphäre übertragen [TSURUTANI et al., 2006]. Die Hochgeschwindigkeits-Sonnenwinde können zudem auf ihrem Weg mit dem langsameren Sonnenwind interagieren. An den Grenzflächen zwischen langsamen und schnellen Plasma der Sonne treten geomagnetische Störungen auf, die wiederum das Magnetfeld der Erde beeinflussen. Der Zusammenhang der Variabilität koronaler Löcher mit Größen des Sonnenwindes und geomagnetischen Parametern wurde beispielsweise durch TEMMER et al. [2007] untersucht. Dabei wurde ein 9-Tage-Zyklus für das Auftreten koronaler Löcher und die Änderungen von Parametern des Sonnenwindes festgestellt. In der Atmosphäre wurde der 9-Tage-Zyklus zum Beispiel durch LEI et al. [2008] beschrieben. Wenn die Ionosphäre durch solare Aktivität, also einen eintreffenden Hochgeschwindigkeits-Sonnenwind, verändert wird, benötigt sie nach Ende des Ereignisses eine Zeit von etwa 4 Tagen, um in den vorherigen Zustand zurückzukehren. Eine Untersuchung zu diesem Effekt ist durch DENTON et al. [2009] erfolgt.

Die langfristigen Auswirkungen solarer Aktivität auf die Atmosphäre und Ionosphäre sind ein komplexes Problem, das von verschiedenen Faktoren abhängt: Konzentration der Treibhausgase, langfristige Änderungen in der geomagnetischen und solaren Aktivität, Änderungen des Erdmagnetfeldes, Änderungen in der Ozonschicht und Änderungen in den ablaufenden Prozessen der Atmosphäre. Die Änderungen der Ionosphäre sind zudem von weiteren Faktoren abhängig, weshalb langfristige Trends der Ionosphäre räumlich und zeitlich analysiert werden müssen. Tiefergehende und ausführliche Betrachtungen zu den langfristigen Trends der Atmosphäre und Ionosphäre durch solare oder geomagneti-

sche Aktivität sind beispielsweise durch BREMER [1998], DANILOV [2002] und LAŠTOVIČKA [2005] gegeben.

Kurzfristige Änderungen der Ionosphäre werden vor allem durch geomagnetische Stürme ausgelöst, die wiederum durch koronale Massenauswürfe und Hochgeschwindigkeits-Sonnenwinde entstehen. Geomagnetische Stürme, die durch koronale Massenauswürfe verursacht werden, sind wesentlich stärker, da sie eine Vielzahl geladener Teilchen in die Atmosphäre bringen, erheblich die Magnetosphäre beeinflussen und zusätzliche Ionisation verursachen. Wie die Ionosphäre auf bestimmte geomagnetische Stürme in der Vergangenheit reagiert hat, ist zum Beispiel in MANSILLA und ZOSSI [2013], TSIDU und ABRAHA [2014] oder BORRIES und BERDERMANN [2014] beschrieben.



## 7 Bedeutung der Ionosphäre für die Kommunikation und Navigation

Die Signale von Kommunikations- und Navigationssystemen durchqueren die Atmosphäre der Erde und damit auch die Ionosphäre, die auf diese Signale, also elektromagnetische Wellen, Einfluss hat. Im Folgenden wird zunächst der Brechungsindex der Atmosphäre erläutert. Anschließend werden die Auswirkungen auf die Signalausbreitung von Navigationssystemen diskutiert. In der Fachliteratur wird beispielsweise in DAVIES [1990], HOFMANN-WELLENHOF et al. [1997], XU [2007], BLAUNSTEIN und PLOHOTNIUC [2008] und MANSFELD [2009] der Einfluss der Ionosphäre auf Kommunikations- und Navigationssysteme beschrieben.

### 7.1 Der ionosphärische Brechungsindex

Im Allgemeinen beschreibt der Brechungsindex  $n$ , wie sich elektromagnetische Wellen in einem Medium ausbreiten. Der Brechungsindex  $n$  ist dabei eine dimensionslose Zahl, die der Quotient von Lichtgeschwindigkeit  $c$  und Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der Welle im Medium ist

$$n = \frac{c}{v}. \quad (25)$$

Innerhalb der Atmosphäre lässt sich der Brechungsindex in troposphärischen und ionosphärischen Anteil aufteilen. Innerhalb der Troposphäre bestimmen die Temperaturverteilung und die Druckverhältnisse die Größe des Brechungsindex; in der Ionosphäre wird hauptsächlich durch die geladenen Teilchen des Plasmas die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen beeinflusst [HEISE, 2002]. Im Gegensatz zur Troposphäre handelt es sich bei der Ionosphäre um ein dispersives Ausbreitungsmedium. Das heißt, der Brechungsindex der Ionosphäre ist frequenzabhängig und damit für hochfrequente Trägerschwingungen  $n_p$  mit einer einzigen Frequenz und für Gruppen von Frequenzen  $n_g$  zu unterscheiden.

Im Folgenden werden beide Brechungsindizes nach MANSFELD [2009] hergeleitet. Mit Gleichung 25 kann der jeweilige Brechungsindex mit der Phasengeschwindigkeit  $v_p$  oder die Gruppengeschwindigkeit  $v_g$  formuliert werden.

Phasengeschwindigkeit:

$$n_p = \frac{c}{v_p}, \quad (26)$$

Gruppengeschwindigkeit:

$$n_g = \frac{c}{v_g}. \quad (27)$$

Der Brechungsindex  $n_p$  lässt sich als Reihe von Potenzen aufstellen

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (28)$$

Der Zustand der Ionosphäre bestimmt hierbei die Koeffizienten  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $c_4$ , usw. Sie werden durch die Elektronendichte  $N_e$  bestimmt und sind frequenzunabhängig. Der Einfluss der Glieder höherer Ordnung, wie zum Beispiel in HOQUE und JAKOWSKI [2010] beschrieben, wird vernachlässigt. Diese Vereinfachung führt zu der Näherungsgleichung

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2}. \quad (29)$$

Der Koeffizient  $c_2$  kann durch die folgende, empirische Gleichung beschrieben werden

$$c_2 = -40.3N_e. \quad (30)$$

Daraus folgt der Brechungsindex  $n_p$  mit

$$n_p = 1 - \frac{40.3N_e}{f^2}. \quad (31)$$

Um den Brechungsindex für Gruppen von Frequenzen bestimmen zu können, wird der Zusammenhang zwischen Phasengeschwindigkeit und Gruppengeschwindigkeit genutzt, der durch folgende Gleichung gegeben ist

$$v_p = v_g - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda}. \quad (32)$$

Daraus folgt der Brechungsindex  $n_g$  mit

$$n_g = n_p + f \frac{dn_p}{df} = 1 + \frac{40.3N_e}{f^2}. \quad (33)$$

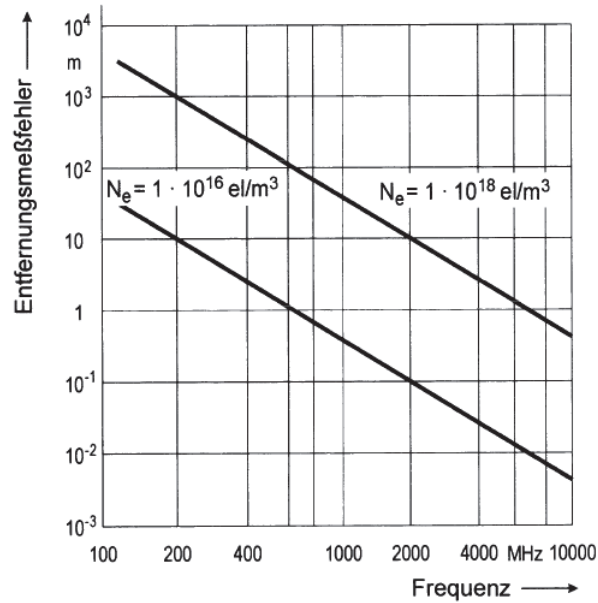


Abbildung 14: Entfernungsmessfehler durch ionosphärische Brechung in Abhängigkeit von der Elektronendichte  $N_e$ . Der Messfehler wird mit größeren Frequenzen kleiner. Der Einfluss der Ionosphäre ist demnach bei Signalen mit kleineren Frequenzen größer [MANSFELD, 2009].

Gleichung 31 wie auch Gleichung 33 verdeutlichen, dass sich Phasen- und Gruppenbrechungsindex im Betrag sehr ähnlich sind, sich aber im Vorzeichen unterscheiden. Die Gleichungen zeigen zudem auf, dass durch die Proportionalität zum Quadrat der Frequenz mit hohen Frequenzen der Einfluss der Ionosphäre verkleinert werden kann. Hierbei muss jedoch der Effekt der atmosphärischen Dämpfung berücksichtigt werden; diese nimmt bei steigender Frequenz zu.

Mithilfe der Elektronendichte  $N_e$  und den Gleichungen Gleichung 31 und Gleichung 33 können jeweils der Brechungsindex und die Laufzeiten von elektromagnetischen Wellen innerhalb der Ionosphäre berechnet werden. In Abbildung 14 ist dazu dargestellt, wie sich der Fehler in der Entfernung bei verschiedenen Frequenzen zu bestimmten Elektronendichten verhält. Die Bestimmung des Messfehlers in der Entfernung wird im folgenden Kapitel erläutert.

## 7.2 GNSS-Signalausbreitung in der Ionosphäre

Mithilfe von globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS) werden Positionsbestimmung und Navigation auf der Erde ermöglicht. Hierzu gehören Systeme wie das Global

Positioning System (GPS), das Global Navigation Satellite System (GLONASS), Galileo oder Beidou. In XU [2007] und MANSFELD [2009] werden die verschiedenen Systeme genauer beschrieben.

Ein GNSS besteht aus einem oder mehreren Satellitenkonstellationen, die einem Empfänger ihre genaue Position und Uhrzeit mitteilen. Erhält der Empfänger Daten von mindestens vier Satelliten können mit den gemessenen Laufzeiten eines Signals die Pseudoentfernungen berechnet werden. Diese Entfernungen sind noch mit dem Uhrfehler behaftet. Unter Einbeziehung des vierten Satelliten können der Uhrfehler und die Position bestimmt werden.

Die GNSS-Signalausbreitung wird durch die Interaktion der elektromagnetischen Wellen mit dem Plasma der Ionosphäre beeinträchtigt. Wie bereits gezeigt, weichen Signale in der Ionosphäre durch Brechung von ihren ursprünglichen Weg ab und werden zusätzlich in ihrer Amplitude, Phase oder auch Polarisation verändert. Signale, die unter einer bestimmten Frequenz  $f_0(h)$  liegen, werden zudem von der Ionosphäre reflektiert (siehe Abbildung 15). Die kritische Frequenz  $f_0(h)$  des Plasmas für eine Höhe  $h$  und der zugehörigen Konzentration des Plasmas  $N_0$ , kann nach BLAUNSTEIN und PLOHOTNIUC [2008] folgendermaßen bestimmt werden

$$f_0(h) = 8.9788\sqrt{N_0(h)}. \quad (34)$$

Diese Eigenschaft erlaubt es einerseits, Radar- und Telekommunikationssystemen große Entfernungen zu überbrücken, andererseits muss die Frequenz, mit der ein GNSS arbeitet, stets über dieser kritischen Frequenz liegen.

Wie in Kapitel 7.1 aufgezeigt, ist die Ausbreitung von Signalen in der Ionosphäre abhängig von der Frequenz. So werden Codemessungen verlangsamt (Gruppengeschwindigkeit) und Trägerphasenmessungen beschleunigt (Phasengeschwindigkeit). Dieser Einfluss kann aber durch die Verwendung von zwei Trägerfrequenzen behoben werden, sodass nur ein Restfehler bleibt. Ist die Ionosphäre durch starke Sonnenaktivität angeregt, wird dieser Fehler größer [GEODZ, 2014].

Die in Code- und Phasenmessung auftretenden Ausbreitungsfehler können wie in HOFMANN-WELLENHOF et al. [1997] hergeleitet werden. Die gemessene Strecke  $s$  zwischen Sender  $S$  und Empfänger  $E$  ergibt sich nach dem Fermat'schen Prinzip

$$s = \int_S^E nds. \quad (35)$$

Die Strecke  $s$  verläuft entlang des Signalpfades. Die Strecke  $s_0$  ist hingegen die geradlinige

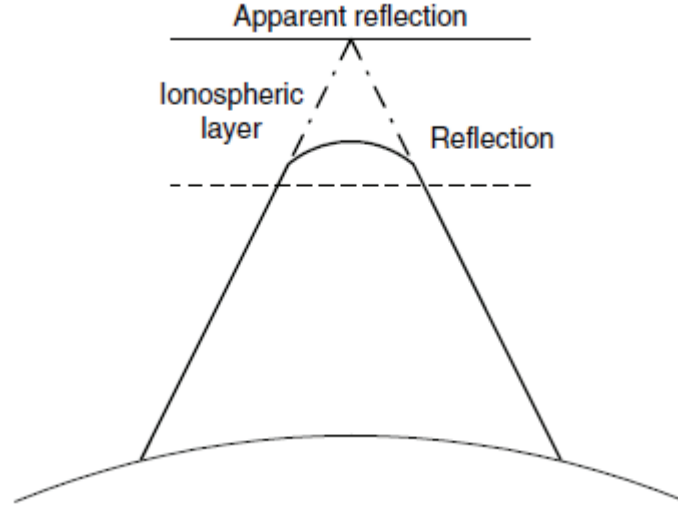


Abbildung 15: Reflexion in der inhomogenen Ionosphäre. Signale, die unter einer kritischen Frequenz  $f_0(h)$  liegen, werden von der Ionosphäre reflektiert [BLAUNSTEIN und PLOHOTNIUC, 2008].

Verbindungsline zwischen Sender und Empfänger und ergibt sich durch das Setzen des Brechungsindex auf  $n = 1$  mit

$$s_0 = \int_S^E ds_0. \quad (36)$$

Die Differenz der Strecken ist der ionosphärische Ausbreitungsfehler  $\Delta^{Iono}$  mit

$$\Delta^{Iono} = \int_S^E n ds - \int_S^E ds_0. \quad (37)$$

Mit der Gleichung 31 für die Phasenmessung und der Gleichung 33 für die Codemessung ergeben sich die zugehörigen Ausbreitungsfehler.

Ausbreitungsfehler der Phasenmessung  $\Delta_{Phase}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Phase}^{Iono} = \int_S^E 1 - \frac{40.3N_e}{f^2} ds - \int_S^E ds_0. \quad (38)$$

Ausbreitungsfehler der Codemessung  $\Delta_{Code}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Code}^{Iono} = \int_S^E 1 + \frac{40.3N_e}{f^2} ds - \int_S^E ds_0. \quad (39)$$

Durch die vereinfachende Annahme, dass der erste Term von Gleichung 38 und Gleichung 39 entlang der geradlinigen Verbindungslinie zwischen Sender und Empfänger verläuft, kann  $ds$  durch  $ds_0$  ersetzt werden.

Ausbreitungsfehler der Phasenmessung  $\Delta_{Phase}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Phase}^{Iono} = \int_S^E -\frac{40.3N_e}{f^2} ds_0 = -\frac{40.3}{f^2} \int_S^E N_e ds_0. \quad (40)$$

Ausbreitungsfehler der Codemessung  $\Delta_{Code}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Code}^{Iono} = \int_S^E \frac{40.3N_e}{f^2} ds_0 = +\frac{40.3}{f^2} \int_S^E N_e ds_0. \quad (41)$$

Der Total Electron Content (TEC) ist definiert durch

$$TEC = \int_S^E N_e ds_0. \quad (42)$$

Der TEC beschreibt die Anzahl der freien Elektronen entlang der Strecke zwischen Sender und Empfänger in einer Säule mit  $1 \text{ m}^2$  Querschnitt. Die zugehörige Einheit ist TEC Unit (TECU) mit  $1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ m}^{-2}$ . Das Einsetzen von Gleichung 42 führt zu folgenden Gleichungen.

Ausbreitungsfehler der Phasenmessung  $\Delta_{Phase}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Phase}^{Iono} = -\frac{40.3}{f^2} TEC. \quad (43)$$

Ausbreitungsfehler der Codemessung  $\Delta_{Code}^{Iono}$ :

$$\Delta_{Code}^{Iono} = +\frac{40.3}{f^2} TEC. \quad (44)$$

Die Bestimmung von TEC und die damit verbundene Modellierung der Ionosphäre werden in Kapitel 8.3.1 beschrieben.

## 8 Beobachtung und Modellierung der Ionosphäre

Die Ionosphäre kann GNSS und Kommunikationssysteme in ihrer Funktionsweise signifikant beeinflussen. Damit die Störungen für die jeweilige Anwendung gering bleiben, berechnet man Korrekturen mithilfe von Ionosphärenmodellen. Das Ziel solcher Modelle ist, relevante Parameter wie die Elektronendichteverteilung oder den Gesamtelektronengehalt zeitlich und räumlich zu beschreiben.

Im Folgenden wird das Modell der International Reference Ionosphere beschrieben, um wiederzugeben, welche Bestandteile ein vollständiges Ionosphärenmodell ausmachen. Im Weiteren werden dann TEC-Modelle und ihre Anwendung beschrieben. Im Detail wird auf die TEC-Kartenerstellung des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) und der Technical University of Catalonia (UPC) eingegangen, da diese TEC-Karten in der Auswertung zum Einsatz kamen. Zuletzt wird der solare Radioflussindex F10.7 ausführlicher vorgestellt, da er als Maß für die solare Aktivität in einer Vielzahl von Modellen eingeht. Die verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf die solare Aktivität konnte in JAKOWSKI et al. [1994] anhand des F10.7 nachgewiesen werden, wobei eine mögliche Phasenverschiebung zu der solaren EUV-Strahlung zur damaligen Zeit nicht geklärt werden konnte. Ob eine Verzögerung zwischen F10.7 und EUV vorliegt, soll auch mit den vorliegenden Daten geprüft werden, da diese Frage noch nicht eindeutig geklärt werden konnte. So findet beispielweise CHAKRABARTY et al. [2012] eine gute Übereinstimmung von EUV und F10.7. In KANE [2005] wurden hingegen Unterschiede in einem Vergleich aufgezeigt.

### 8.1 International Reference Ionosphere

Das International Reference Ionosphere (IRI) ist ein Projekt des Committee on Space Research (COSPAR) und der International Union of Radio Science (URSI). Die gebildete Arbeitsgruppe begann in den späten sechziger Jahren mit der Entwicklung eines empirischen Standardmodells der Ionosphäre. Seitdem wurde das Modell stetig weiterentwickelt und die Anpassungen wurden veröffentlicht. Das Modell beschreibt die folgenden Parameter: Elektronendichte, Elektronentemperatur, Ionentemperatur, Ionenzusammensetzung ( $O^+$ ,  $H^+$ ,  $He^+$ ,  $NO^+$ ,  $O_2^+$ ), Ionenströmung, TEC, Wahrscheinlichkeit der F1-Schicht oder von Spread-F. Die Elektronendichte, Elektronentemperatur, Ionentemperatur und Ionenzusammensetzung können für einen beliebigen Ort zu jeder Zeit als monatliches Mittel in einer Höhe von 50 bis 2000 km bestimmt werden. Daten für IRI werden durch das weltweite Netzwerk von Ionosonden, Scatter-Radare, die Alouette-

Satelliten sowie die International Satellites for Ionospheric Studies (ISIS) und weitere Raketen- und Satellitenprojekte bereitgestellt [BILITZA, 2014b].

1999 wurde das IRI zum internationalen Standard erklärt. Die letzte Version des Modells ist IRI 2012, deren aktueller Status in BILITZA [2014a] beschrieben wird.

## 8.2 Bedeutung der TEC-Modellierung

Wie in Kapitel 7.2 dargestellt, werden GNSS durch Ausbreitungsfehler in der Ionosphäre beeinflusst. Die Ausbreitungsfehler konnten über den TEC (siehe Gleichung 43 und Gleichung 44) beschrieben werden. TEC, also die Anzahl der freien Elektronen entlang der Strecke zwischen Sender und Empfänger, lässt sich über GNSS-Messungen direkt oder in Modellen bestimmen.

Wie der Nutzer zu den benötigten Korrekturen für eine GNSS-Messung kommt, hängt vom jeweiligen GNSS ab. Die Nutzer von GPS können beispielsweise die gesendeten Parameter des Klobuchar-Modells anwenden [KLOBUCHAR, 1987]. Dieses empirische Modell geht von einer dünnen Schicht in 350 km Höhe aus, in der sich die Elektronen der Ionosphäre befinden. An dem Durchstoßpunkt der Schicht zwischen Sender und Empfänger kann mithilfe der vertikalen Verzögerung die geeignete Verzögerung berechnet werden. Die Berücksichtigung weiterer Faktoren und die Anwendung von Mapping-Funktionen führen zu den zugehörigen Korrekturen. Das Klobuchar-Modell verringert den Ausbreitungsfehler der Ionosphäre im quadratischen Mittel um 50%. Das NeQuick-Modell, wie zum Beispiel in NAVA et al. [2008] beschrieben, kommt für Nutzer von Galileo zu Anwendung. Das Modell orientiert sich an der vorangegangenen Arbeit von GIOVANNI und RADICELLA [1990] und liefert ein dreidimensionales, zeitabhängiges Modell der Elektrodichte in der Ionosphäre.

Die Korrekturen für den ionosphärischen Ausbreitungsfehler können auch durch unterstützende Systeme bereitgestellt werden. Das Satellite Based Augmentation System (SBAS) liefert solche Informationen. Das SBAS besteht aus mehreren Subsystemen, die bestimmten Regionen der Erde zugeordnet sind: Wide Area Augmentation System (Nordamerika), European Geostationary Navigation Overlay Service (Europa), Multifunctional Satellite Augmentation System (Japan) und GPS Aided Geo Augmented Navigation (Indien).

Die TEC-Modellierung ermöglicht weiterhin die Kalibrierung GNSS-basierter TEC-Karten und dient der Vorhersage zur zukünftigen Entwicklung des TEC.



## 8.3 SWACI TEC-Karten

Seit 1995 werden durch das DLR GNSS-basierte TEC-Beobachtungen für das europäische Gebiet ausgeführt. Seit 2006 besteht der operationelle Datendienst Space Weather Application Center – Ionosphere (SWACI), der regionale und globale TEC-Karten, Modellinformationen und stündliche Vorhersagen bereitstellt. Der Dienst nutzt GNSS-basierter TEC-Beobachtungen in Echtzeit zusammen mit dem Neustrelitz TEC-Modell (NTCM) in einem Verfahren zur TEC-Kalibrierung und zum TEC-Mapping. Im Folgenden werden die TEC-Beobachtung sowie das TEC-Modell, das TEC-Mapping und die Vorhersage von TEC nach JAKOWSKI et al. [2011b] vorgestellt.

### 8.3.1 GNSS-basierte Beobachtung und Modellierung von TEC

Die Datengrundlage für die GNSS-basierten TEC-Beobachtungen des DLR wird im Wesentlichen durch den International GNSS Service (IGS) bereitgestellt. Damit die TEC-Karten, die mit der Datenbasis erstellt werden, eine hohe Qualität haben, werden die Daten bei fehlenden Messungen oder für Regionen, die von Messpunkten weiter entfernt sind, mit einem empirischen Modell kombiniert [JAKOWSKI, 1996]. Seit 2002 werden auf diesem Weg das europäische Gebiet und die nördliche sowie südliche Polarregion beobachtet. Für jede dieser Regionen wurde eine Gruppe von empirischen Modellen entwickelt: NTCM-EU für Europa, NTCM-NP für den Nordpol und NTCM-SP für den Südpol. Nach dem gleichen Prinzip wurde 2011 ein globales Modell NTCM-GL entwickelt [JAKOWSKI et al., 2011a].

Der Ansatz der Modelle ist ein Polynom linearer Terme

$$TEC^{vert} = \sum_{i=1}^5 \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^2 \sum_{l=1}^2 c_{ijkl} \cdot H_i(h) \cdot Y_j(d) \cdot L_k(\phi, \lambda, h, d) \cdot S_l(F10.7). \quad (45)$$

Das Modell berücksichtigt tägliche sowie halbtägige Variationen  $H_i(h)$ , jährliche sowie halbjährliche Variationen  $Y_j(d)$ , die Abhängigkeit zur geografischen Breite sowie zum Zenitwinkel  $L_k(\phi, \lambda, h, d)$  und die solare Aktivität  $S_l(F10.7)$ , die durch F10.7 bestimmt wird. Die linearen Modellkoeffizienten  $c_{ijkl}$  werden durch die Methode der kleinsten Quadrate bestimmt.

Mithilfe der Mapping-Funktion  $M(\varepsilon)$  erfolgt die Umrechnung zwischen slant und vertikalen TEC

$$M(\varepsilon) = TEC^{slnt} / TEC^{vert} = \left( 1 - \left( \frac{R_e \cos \varepsilon}{R_e + h_{sp}} \right)^2 \right)^{-\frac{1}{2}}. \quad (46)$$

In der Mapping-Funktion stehen der Erdradius  $R_e$ , die Elevation  $\varepsilon$  und die Höhe für die einschichtige Approximation der Ionosphäre  $h_{sp}$ .

### 8.3.2 TEC-Kalibrierung von GNSS-Messungen

Um mit den GNSS-Daten absolute TEC-Werte berechnen zu können, müssen die Bias von Sendern und Empfängern bestimmt werden. Durch zwei Trägerphasenmessungen, also L1 und L2 für GPS, können relative TEC-Werte ermittelt werden.

Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen:

$$L_1 = \rho - \frac{K}{f_1^2} TEC^{slnt} + \lambda_1 N_1 + \varepsilon_{L1}, \quad (47)$$

$$L_2 = \rho - \frac{K}{f_2^2} TEC^{slnt} + \lambda_2 N_2 + \varepsilon_{L2}. \quad (48)$$

Die geometrische Distanz  $\rho$  zwischen Sender und Empfänger enthält alle Fehlerquellen, die nicht durch Lichtbrechung verursacht werden. Weiterhin stehen die Mehrdeutigkeiten  $N_{1,2}$ , die zu L1 sowie L2 gehörenden Frequenzen  $f_{1,2}$ , die restlichen Fehlerquellen  $\varepsilon_{L1,L2}$  (zum Beispiel das Rauschen der Phase) und  $K = 40.3 \text{ m}^3\text{s}^{-2}$  in der Gleichung. Die Codemessung lässt sich analog beschreiben.

Beobachtungsgleichung für Codemessungen:

$$P_1 = \rho + \frac{K}{f_1^2} TEC^{slnt} + \varepsilon_{P1}, \quad (49)$$

$$P_2 = \rho + \frac{K}{f_2^2} TEC^{slnt} + \varepsilon_{P2}. \quad (50)$$

Da es schwierig ist, die Mehrdeutigkeiten und Bias genau zu lösen, werden die TEC-Werte durch Trägerphasen- und Codemessung bestimmt

$$TEC^{slnt,Phase} = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{K(f_1^2 - f_2^2)} \cdot (L_1 - L_2), \quad (51)$$

$$TEC^{slnt,Code} = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{K(f_1^2 - f_2^2)} \cdot (P_2 - P_1). \quad (52)$$

Die Differenz von  $TEC^{slnt,Code}$  und  $TEC^{slnt,Phase}$  ergibt den Offset  $TEC_{off}^{slnt}$  mit

$$TEC_{off}^{slnt} = TEC^{slnt,Code} - TEC^{slnt,Phase}. \quad (53)$$

Mit den TEC-Werten der Trägerphase, die ein geringes Rauschen aufweist, und dem Mittelwert  $\langle TEC_{off}^{slnt} \rangle$  ergibt sich der geglättete relative TEC

$$TEC_{rel}^{slnt} = TEC^{slnt,Phase} - \langle TEC_{off}^{slnt} \rangle. \quad (54)$$

Der Mittelwert  $\langle TEC_{off}^{slnt} \rangle$  wird mit jeder Epoche  $i$  aktualisiert. Die neue Epoche  $i+1$  wird mithilfe des letzten Mittelwertes und der neuen Messung bestimmt

$$\langle TEC_{off}^{slnt} \rangle_{i+1} = \frac{i}{i+1} \langle TEC_{off}^{slnt} \rangle_i + \frac{1}{i+1} TEC_{off,i+1}^{slnt}. \quad (55)$$

Geht während der Messung die Phasenbeziehung verloren, wird der Mittelwert zurückgesetzt und das Verfahren beginnt erneut.

Für die Kalibrierung wird ein ionosphärisches Modell benötigt, das so gut wie möglich das Verhalten der Ionosphäre wiedergibt. Ein solches Modell ist das NTCM, mit dem feste TEC-Werte als Referenz für die Kalibrierung bereitgestellt werden. Das NTCM wird während des Verfahrens genau wie die Bias stetig aktualisiert.

Der Ansatz der Kalibrierung für die Epoche  $i$  ist durch folgende Gleichung gegeben

$$TEC_i^{slnt} = TEC_{NTCM}^{slnt} + b_{RX} - b_{SAT} + \varepsilon_N. \quad (56)$$

$b_{SAT}$  und  $b_{RX}$  stehen für die Bias von Sender und Empfänger;  $\varepsilon_N$  gibt den Messfehler wieder, der beim Glätten der Code- und Trägerphase bestimmt wird. Der  $TEC_{NTCM}^{slnt}$  ist der mit dem regionalen oder globalen Modell ermittelte TEC, der abhängig von Ort und Zeit ist (siehe Gleichung 45). Mit der Mapping-Funktion (siehe Gleichung 46) werden die

vertikalen TEC-Werte berechnet. Zuletzt wird die Abhängigkeit zum operationellen Modell festgestellt, was die Unterscheidung von Bias erlaubt, die sich schnell oder langsam verändern. Die Bias  $b_{RX}$  und  $b_{SAT}$  werden über die Methode der kleinsten Quadrate mit den Modellkoeffizienten und Messdaten bestimmt. Alle 24 Stunden wird eine gewichtete Berechnung nach der Methode der kleinsten Quadrate mit den Modellkoeffizienten und den Bias durchgeführt.

Der lineare Ansatz von Gleichung 45 wird neu formuliert

$$y = Ax + \varepsilon. \quad (57)$$

Die Matrix  $A$  enthält alle grundlegenden Funktionen des Modells und die Einträge für die Bias,  $y$  ist der gemessene slant TEC,  $x$  sind die Modellkoeffizienten und  $\varepsilon$  sind die Messfehler.

Die gewichtete Methode der kleinsten Quadrate (WLS) wird mit einer Verlustfunktion beschrieben

$$S^{WLS} = \frac{1}{2}(y - Ax)^T W (y - Ax), W^{-1} = \text{cov}\varepsilon. \quad (58)$$

Durch die folgende Gleichung wird die Verlustfunktion vereinfacht

$$x = CA^T W y, C = (A^T W A)^{-1}. \quad (59)$$

Diese Lösung wird alle 24 Stunden auf den Datensatz des vergangenen Tages angewendet. Um weiterhin Lösungen alle fünf Minuten liefern zu können, wird ein rekursiver Filter angewendet, der die Koeffizienten und Bias des aktuellen Modells bestimmt. Die Gleichung für diesen Filter ergibt sich aus der folgenden Verlustfunktion

$$S^{WLS,Filter} = \frac{1}{2}(y - Ax_{m+1})^T W (y - Ax_{m+1}) + \frac{1}{2}(x_{m+1} - P_{m+1,m}x_m)^T \cdot C_{m+1}^{-1}(x_{m+1} - P_{m+1,m}x_m). \quad (60)$$

Die Differenz beider Verlustfunktionen ist der zweite Summand von  $S^{WLS,Filter}$ . Die Lösung der vergangenen Epoche  $x_m$  mit einem Projektor  $P_{m+1,m}$  auf die aktuelle Epoche  $x_{m+1}$  projiziert, sollte mit der aktuellen Lösung übereinstimmen. Das Gewicht  $C_{m+1} = C_m + R$  mit der Matrix  $R$ , die die Abweichung des Modells von den Daten parametrisiert, gibt den erlaubten Unterschied an. In Abbildung 16 ist ein Beispiel für das operationelle TEC-Modell am 8. Juli 2014 um 10:30 UT gegeben. Mit dem vorgestellten Verfahren

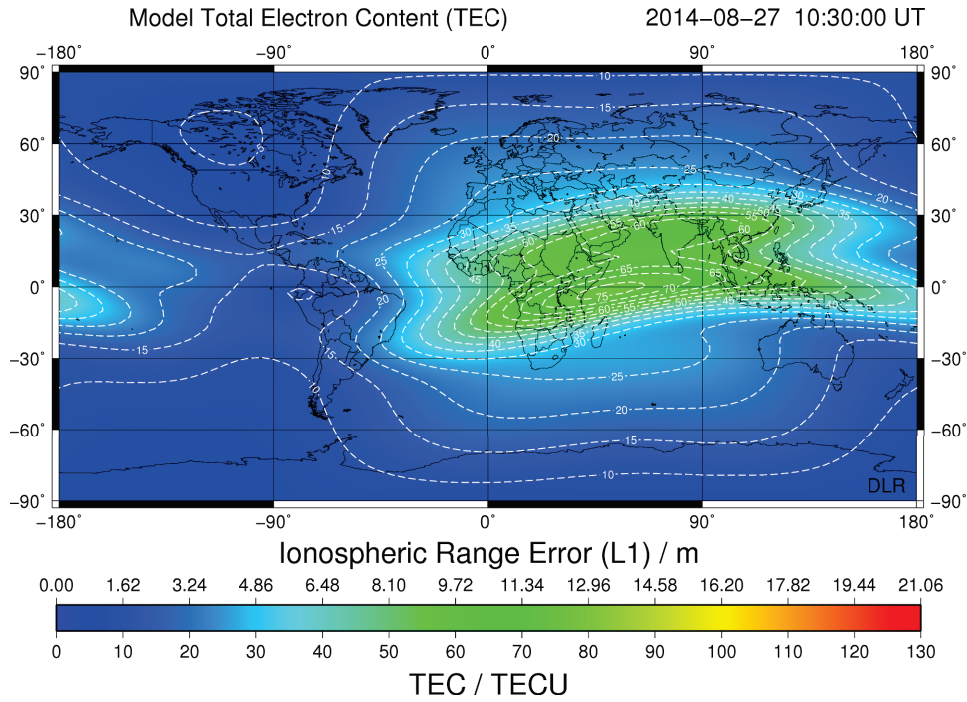


Abbildung 16: Beispiel für NTCM-GL am 8. Juli 2014 um 10:30 UT, SWACI

können Kalibrierung der Bias und Erstellung der TEC-Karten in nahezu Echtzeit durchgeführt werden.

### 8.3.3 TEC-Mapping

Für das Erstellen einer TEC-Karte einer bestimmten Region werden alle Beobachtungen in das zugehörige NTCM assimiliert. Dieses Verfahren hat zwei Vorteile. Kommt es zum Ausfall der operationellen Dienste können weiterhin Ergebnisse geliefert werden, die dann nur auf den Berechnungen des Modells beruhen. Weiterhin sind die GPS-Daten sehr ungleichmäßig verteilt, weshalb Lücken entstehen, die durch das Modell geschlossen werden.

Die Assimilation der TEC-Daten beginnt mit der Anpassung des Modells an alle Beobachtungen. Mit den angepassten Werten  $TEC_{adj}^i$  zur Epoche  $i$  können die Abweichungen  $\Delta TEC_j^i$  an allen  $N$  Durchstoßpunkten  $j$  berechnet werden

$$\Delta TEC_j^i = TEC_j^i - (TEC_{NTCM}^i + TEC_{adj}^i). \quad (61)$$

Alle Abweichungen erfüllen die folgende Bedingung

$$\sum_{j=1}^N \Delta TEC_j^i = 0. \quad (62)$$

Die Gewichtung eines TEC-Wertes an Durchstoßpunkt  $j$  mit der Distanz  $D_{jkl}^i$  zum Gitterpunkt  $(k, l)$  wird mit einer gaußschen Gewichtungsfunktion beschrieben

$$WF_j^i(k, l) = \exp\left(-\frac{(D_{jkl}^i)^2}{2s_w^2}\right). \quad (63)$$

Die Funktion wird für alle Beobachtungen ausgeführt. Der Parameter  $s_w$  bestimmt in der Funktion den horizontalen Einfluss der Abweichung auf das endgültige Ergebnis. Der Parameter ist abhängig von der vorliegenden Datendichte und kann je nach Korrelation oder Anzahl der Stationen angepasst werden.

Für jeden Gitterpunkt  $(k, l)$  der TEC-Karte werden die Abweichungen zwischen Beobachtungen und Modell ermittelt

$$\Delta TEC^i(k, l) = \frac{\sum_{j=1}^N \Delta TEC_j^i \cdot WF_j^i(k, l)}{\sum_{j=1}^N (WF_j^i(k, l) + \gamma)}. \quad (64)$$

Der Wert  $\gamma$  ist sehr klein gewählt und verhindert das Auftreten von Definitionslücken in der Gleichung. Der TEC-Wert für den Gitterpunkt ergibt sich schließlich durch

$$TEC(k, l) = TEC^i(k, l) + TEC_{NTCM}^i(k, l) + TEC_{adj}^i. \quad (65)$$

Um die TEC-Karte zu erzeugen, wird die Berechnung für alle Punkte durchgeführt. In Abbildung 17 ist eine TEC-Karte für den 8. Juli 2014 um 10:30 UT zu sehen.

### 8.3.4 TEC-Vorhersage

Die TEC-Karten sind für den Nutzer trotz der Berechnungen und des Datenmanagements in nahezu Echtzeit verfügbar. Der Nutzer, der bei der Verwendung eines GNSS hauptsächlich den ionosphärischen Ausbreitungsfehler benötigt, ist aber insbesondere an der Vorhersage von Störungen für sein System interessiert. In JAKOWSKI et al. [2011b] wird hierfür eine Modell-unterstützte Lösung vorgeschlagen, welche die Trends in den Gitterpunkten nutzt.

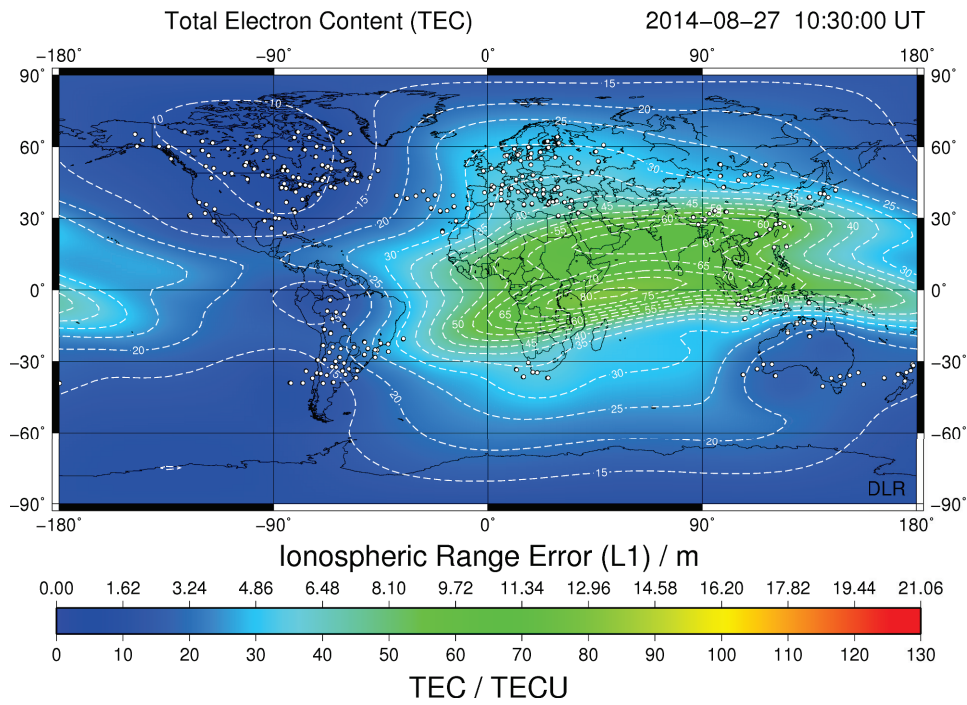


Abbildung 17: Beispiel für globale TEC-Karte am 8. Juli 2014 um 10:30 UT, SWACI

Im Detail werden für einen Gitterpunkt  $(k, l)$  der vorliegende Trend und das Modell kombiniert

$$TEC^{fci}(k, l) = (1 - \eta)TEC_{NTCM}^{fci}(k, l) + \eta (\Delta TEC_j^i(k, l) / (t^i - t^{i-1})) \cdot T^{fc}. \quad (66)$$

Mit  $T^{fc}$  wird bestimmt, wie viele Stunden im Voraus der TEC bestimmt werden soll. Die tatsächliche Zeit zur Epoche  $i$  ist mit  $t$  gegeben. Der Gewichtungsfaktor  $\eta$  bestimmt, in welchem Maße Modell und Trend Einfluss auf den berechneten TEC haben. In Abbildung 18 ist die TEC-Vorhersage für den 8. Juli 2014 um 11:30 UT zu sehen.

## 8.4 IGS TEC-Karten

Seit 1998 werden durch die Ionospheric Working Group des IGS TEC-Karten produziert. Hierbei beteiligen sich unter anderem das Center of Orbit Determination in Europe (CODE), die ESA, das Jet Propulsion Laboratory (JPL) und UPC. Ausführliche Betrachtungen zur Arbeit der Working Group und den Verfahren, die bei der Erstellung der TEC-Karten zur Anwendung kommen, sind zum Beispiel in PÉREZ [2005] und

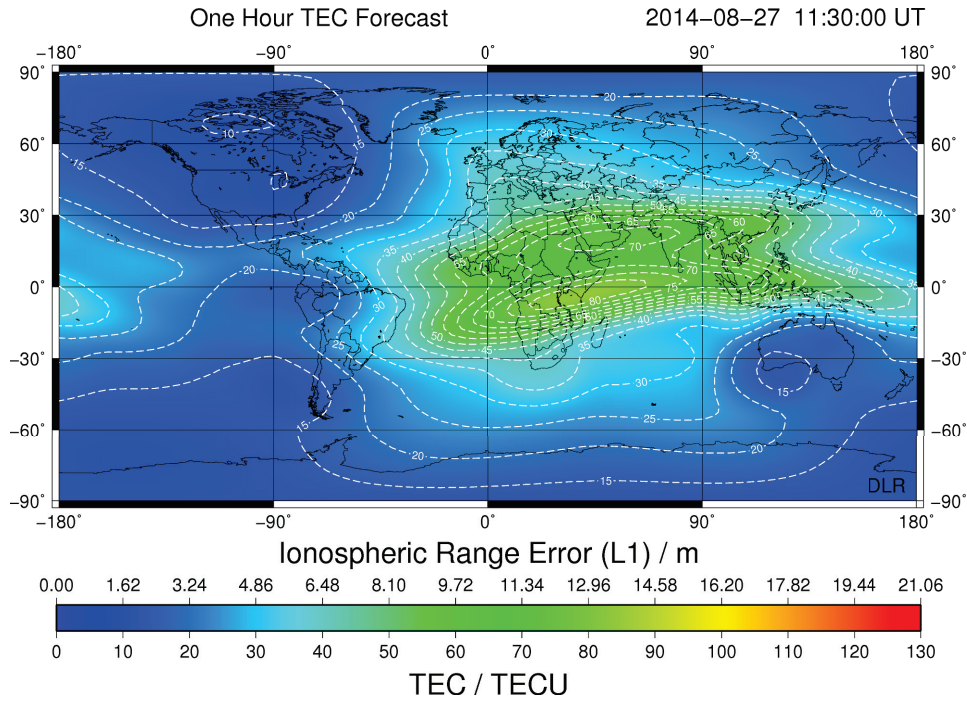


Abbildung 18: Beispiel für für einständige TEC-Vorhersage am 8. Juli 2014 um 10:30 UT, SWACI

HERNÁNDEZ-PAJARES et al. [2009] zu finden. Hier soll im Folgenden deren Ansatz zur TEC-Kartenerstellung erläutert werden.

Für die Erstellung von TEC-Karten werden zwei Strategien angewendet. Das erste Verfahren nutzt die Pseudoentfernung der Codemessung, um die Trägerphasenmessung zu glätten und zunächst den slant TEC zu bestimmen. Mit dem slant TEC werden im Anschluss der vertikale TEC und die Bias berechnet. Das Verfahren ähnelt der TEC-Kartenerstellung des DLR. Das zweite Verfahren verwendet nur die Trägerphase für die Berechnung. Um den endgültigen TEC-Wert zu erhalten, müssen bei der Auswertung des slant TEC die Mehrdeutigkeiten gelöst werden.

Bestimmung von TEC mit der Codemessung:

$$\hat{P}_I(t)_j^i = TEC_j^{slnt,i} + b^i + b_j. \quad (67)$$

Der  $TEC_j^{slnt,i}$  wird mit der Pseudoentfernung  $\hat{P}_I(t)_j^i$  zur Zeit  $t$  und den Bias des Satelliten  $i$  und des Empfängers  $j$  berechnet. Für die Berechnung des vertikalen TEC wird eine Mapping-Funktion verwendet. Hierbei kommen unterschiedliche Lösungen zum Einsatz. CODE nutzt die Erweiterung von Kugelflächenfunktion bis zum Grad 15 [SCHAER, 1999];



ESA führt Berechnungen mit den Chapman-Profilen aus [FELTENS und SCHAER, 1998]; JPL berechnet mit einem Kalman-Filter für jeden Punkt innerhalb eines Dreiecks den TEC und leitet mit den Resultaten die TEC-Werte für die Gitterpunkte ab [MANNUCCI et al., 1998].

Bestimmung von TEC mit der Trägerphasenmessung:

$$L_I(t)_j^i = TEC_j^{slnt,i} + b_j^{i,\nu}. \quad (68)$$

Wie in Gleichung 68 zu sehen, ist die Bestimmung des TEC mit der Trägerphasenmessung ähnlich wie bei der Codemessung. Die Bias werden nicht berücksichtigt, da angenommen wird, dass sie sich nur über größere Zeiträume ändern. Stattdessen wird die Mehrdeutigkeit  $b_j^{i,\nu}$  für jede Satelliten-Empfänger-Konfiguration berücksichtigt. Der  $TEC_j^{slnt,i}$  kann mit Trägerphasenmessung  $L_I(t)_j^i$  zum Zeitpunkt  $t$  für den Satelliten  $i$  und den Empfänger  $j$  ermittelt werden. Der vertikale TEC wird wie zum Beispiel durch UPC mit einem Modell bestimmt, das von JUAN et al. [1997] vorgeschlagen wurde und auf zwei Schichten beruht. Die Ionosphäre wird dazu in Volumenelemente, sogenannte Voxel  $(\alpha, \beta, \gamma)$ , aufgeteilt.

Mit der Elektronendichte  $N_{e,\alpha\beta\gamma}$ , dem Weg  $\Delta s_{\alpha\beta\gamma}$ , den die Strahlung in einem Voxel zurücklegt, und der Koeffizient  $\alpha_I = 0.105 \cdot m_{L_I} / \text{TECU}$  zur Mehrwegausbreitung der Trägerphasenmessung  $m_{L_I}$ , kann Gleichung 68 neu formuliert werden

$$L_I(t)_j^i = \alpha_I \cdot \sum_{\alpha} \sum_{\beta} \sum_{\gamma} N_{e,\alpha\beta\gamma} \cdot \Delta s_{\alpha\beta\gamma} + b_j^{i,\nu}. \quad (69)$$

Die Berechnungen werden mit den Datensatz der vergangenen 48 Stunden für jeden Durchstoßpunkt ausgeführt. Das erste Resultat wird dann geglättet und Lücken werden durch Interpolation geschlossen. Für die Glättung werden gaußsche radiale Basisfunktionen genutzt und die Interpolation wird mit Splines gerechnet.

## 8.5 Vergleich der SWACI und IGS TEC-Karten

Beim Vergleich der TEC-Daten muss berücksichtigt werden, dass die SWACI und IGS TEC-Karten mit unterschiedlichen Zielen bereitgestellt werden und deshalb unterschiedliche Verfahren durchlaufen. Bei den SWACI TEC-Karten handelt es sich um Daten, die nahezu in Echtzeit geliefert werden. Dies macht eine umfangreiche Nachbearbeitung nicht möglich. TEC-Karten von UPC durchlaufen beispielsweise eine solche Nachbearbeitung und werden dann bereitgestellt. Ein weiterer Unterschied beider Datendienste ist die

zeitliche Auflösung, in der die Daten verfügbar sind. Während die SWACI TEC-Karten in 5min-Auflösung vorliegen, werden die meisten IGS TEC-Karten nur in 2h-Auflösung bereitgestellt. TEC-Karten in 1h-Auflösung werden nur durch UPC und ESA produziert; TEC-Karten in 15min-Auflösung werden nur durch UPC erstellt. Für die Untersuchung der verzögerten Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung ist die zeitliche Auflösung beider Datendienste ausreichend.

Ein großes Problem für die folgenden Untersuchungen sind Zeiträume, in denen keine TEC-Karten vorliegen. Solche Lücken, die unterschiedlich groß und häufig sind, kommen in allen Datensätzen vor und müssen bei der Auswahl der Daten berücksichtigt werden.

In der Abbildung 19 sind für das Jahr 2012 die TEC-Daten von ESA, UPC und DLR in 1h-Auflösung gegenübergestellt. Der TEC wird dabei über  $35^{\circ}\text{N}$ ,  $50^{\circ}\text{N}$  sowie  $65^{\circ}\text{N}$  und  $10^{\circ}\text{E}$  im zeitlichen Verlauf als tägliches Mittel dargestellt. Der TEC der drei Datensätze stimmt für kleine geografische Breiten gut überein. Mit zunehmender geografischer Breite wird der TEC vom DLR jedoch immer kleiner im Vergleich zu den anderen Datensätzen. Mit den auftretenden Unterschieden sind weitere Probleme verbunden. Zum Beispiel kann es in den Wintermonaten vorkommen, dass der TEC sehr niedrig ist und infolgedessen das gewählte Minimum aus dem Modell vorliegt, welches nicht unterschritten werden kann. In solchen Zeiträumen liegt dann keine Information mehr für den Verlauf von TEC vor. Die Ursache für das Problem ist die geringe Anzahl an Referenzstation in den nördlichen Breiten, die nicht durch die Modellierung ausgeglichen werden kann.

Unter Berücksichtigung der zeitlichen Auflösung und Vollständigkeit eignen sich die IGS TEC-Karten von UPC am besten für die folgenden Analysen. Deshalb werden sie für die Untersuchung der verzögerten Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung verwendet.

In Kapitel 10.1 werden die festgestellten Probleme der SWACI TEC-Karten ausführlicher diskutiert.

## 8.6 Bedeutung des F10.7 für die Modellierung der Ionosphäre

Um die Atmosphäre, die Ionosphäre und das Weltraumwetter untersuchen zu können, ist es notwendig, die solare Aktivität zu beobachten. Besonders wichtig ist die Messung der solaren EUV-Strahlung, da sie einen direkten Einfluss auf die Ionosphäre ausübt. In der Vergangenheit war die satellitengestützte Beobachtung der EUV-Strahlung (siehe Kapitel 5) nicht kontinuierlich und nur für ein eingeschränktes Spektrum gewährleistet, weshalb verschiedene Indizes eingeführt wurden, mit denen sich auch von der Erde die solare Aktivität messen lässt.

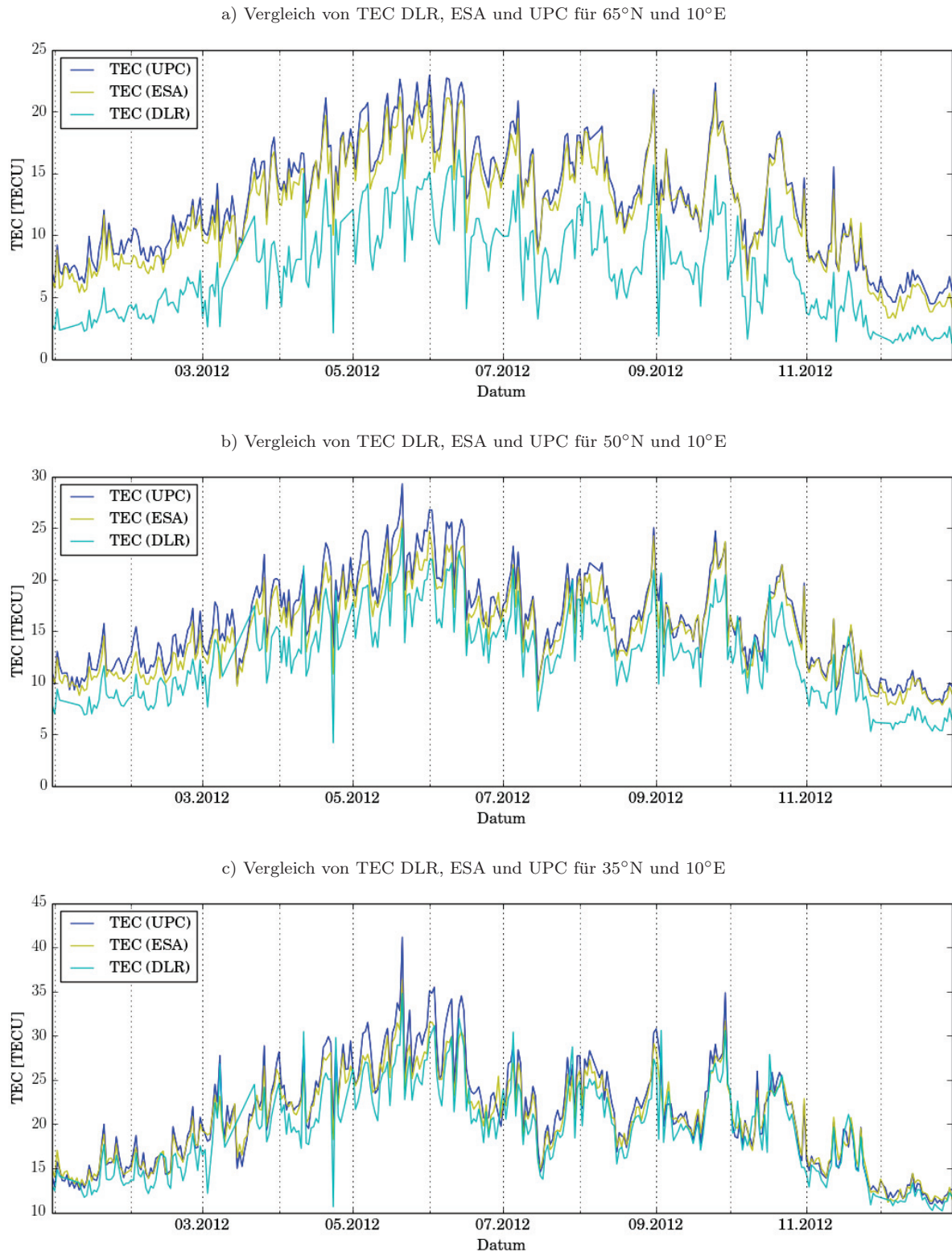


Abbildung 19: Vergleich der verschiedenen TEC-Karten: DLR, ESA und UPC. Die Abbildungen zeigen den Verlauf des TEC an verschiedenen Gitterpunkten bei 10°E in der nördlichen Hemisphäre für das Jahr 2012.

Der älteste Index für diese Aufgabe ist die Sonnenfleckenanzahl, die täglich bestimmt wird. Die Sonnenfleckenanzahl erlaubt Rückschlüsse auf die solare Aktivität, da ein Zusammenhang zwischen auftretenden Sonnenflecken und EUV-Strahlung besteht. Der Index eignet sich jedoch nicht für die Feststellung kurzzeitiger Änderungen [DONNELLY et al., 1985].

Ein weiterer Index ist der MgII-Index, der zu der entsprechenden MgII-Linie mit einer Wellenlänge von 280 nm gehört. Der Index beschreibt besonders gut die UV-Strahlung, eignet sich aber auch als Index für die EUV-Strahlung [VIERECK et al., 2001]. Der Index unterscheidet sich weiterhin von anderen Indizes durch den Umstand, dass er wie die EUV-Strahlung nicht von der Erde aus gemessen werden kann.

Der CaK-Index wird ähnlich wie der MGII-Index verwendet und entspricht der CaK-Linie mit einer Wellenlänge von 393 nm. Mit dem Index lässt sich die UV-Strahlung beschreiben [LEAN et al., 1982].

Ein weiterer Index ist der HeI-Index, der zur HeI-Linie mit einer Wellenlänge von 1083 nm gehört. Der Index liegt im infraroten Wellenlängenbereich und korreliert gut mit der EUV-Strahlung [DONNELLY et al., 1985].

Von besonderem Interesse in Hinblick auf die solare EUV-Strahlung ist der F10.7 mit einer Wellenlänge von 10.7 cm. Der Index mit der Einheit  $1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ Wm}^{-2}\text{Hz}^{-1}$  stimmt, wie zum Beispiel in DONNELLY et al. [1983], FLOYD et al. [2005] und DE WIT et al. [2009] aufgezeigt, gut mit der EUV-Strahlung überein.

In JAKOWSKI et al. [1994] wurde die verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf die solare Aktivität mithilfe von F10.7 festgestellt. Bei der damaligen Untersuchung konnte nicht geklärt werden, ob F10.7 und EUV-Strahlung zusammenhängen. Es wird daher zunächst mit den vorliegenden Daten aufgezeigt, dass keine Verzögerung zwischen dem Index und den gemessenen EUV-Daten der verschiedenen Wellenlängenbereiche vorliegt. Hierzu wird in Abbildung 20 für die Bänder von GOES und in Abbildung 21 für die Kanäle 3 und 4 von LYRA der Verlauf der Daten gegenübergestellt und die entsprechende Kreuzkorrelation berechnet. Als Zeitraum für die Untersuchung ist das Jahr 2012 ausgewählt. Die Kreuzkorrelation für diese Periode zeigt dabei in keinen Fall eine Verzögerung auf; die Phase von EUV-Strahlung und F10.7 stimmen überein. Bei den Amplituden ist je nach Datensatz ein unterschiedlicher Zusammenhang festzustellen. Die beiden Kanäle von LYRA (ohne Berücksichtigung von Ausreißern) stimmen sehr gut mit dem Verlauf von F10.7 überein. Für die verschiedenen Bänder von GOES gibt es hingegen deutliche Unterschiede. Für den gewählten Zeitraum ist die Amplitude der normalisierten EUV-Daten von GOES immer wieder größer als die Amplitude des normalisierten F10.7.

Entscheidend für die Untersuchung der verzögerten Reaktion der Ionosphäre auf die

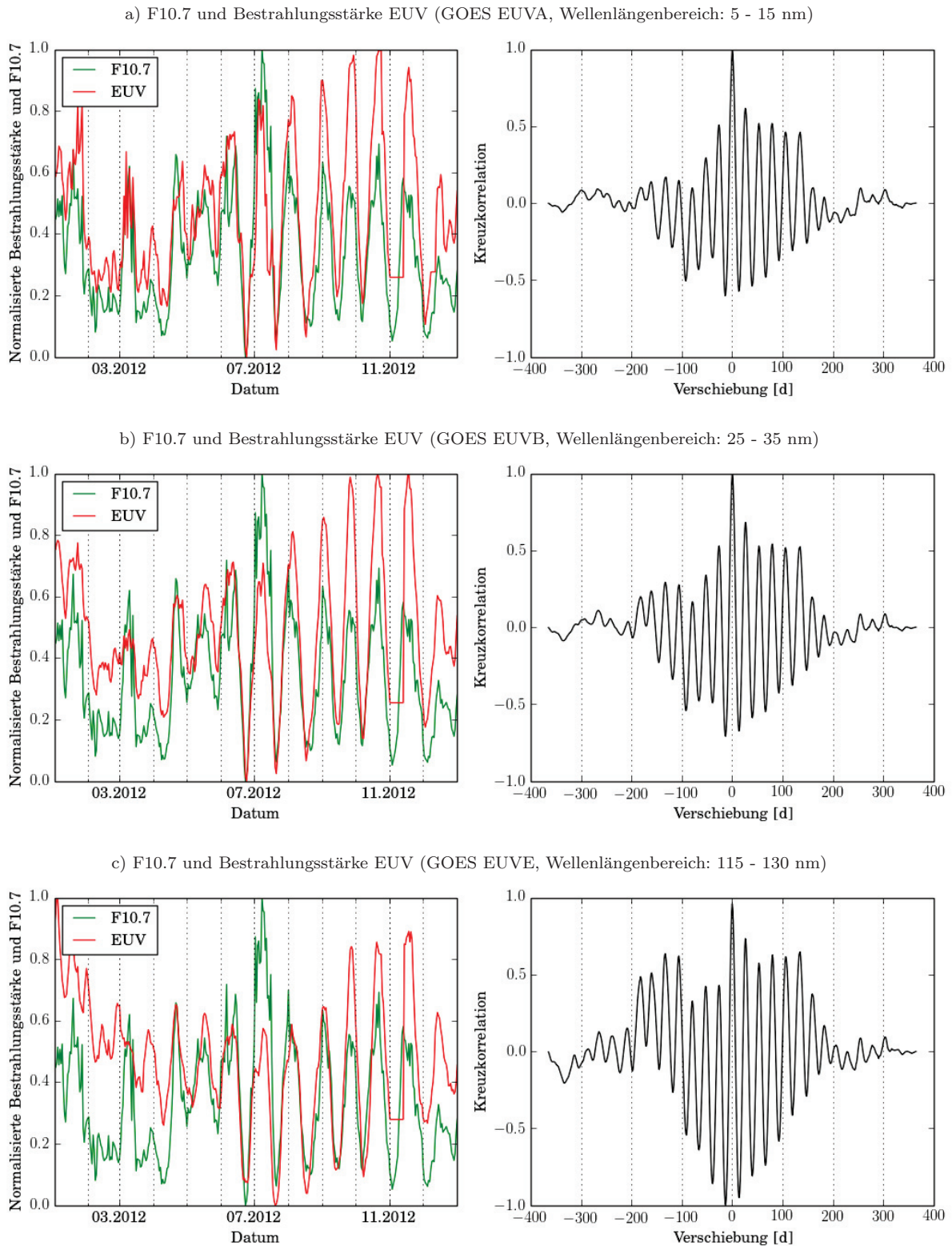


Abbildung 20: In der linken Abbildung ist der normalisierte Verlauf von F10.7 und der täglichen Mittel von EUV für das Jahr 2012 über  $50^{\circ}\text{N}$  und  $10^{\circ}\text{E}$  dargestellt. In der rechten Abbildung ist die zugehörige Kreuzkorrelation der Signale.

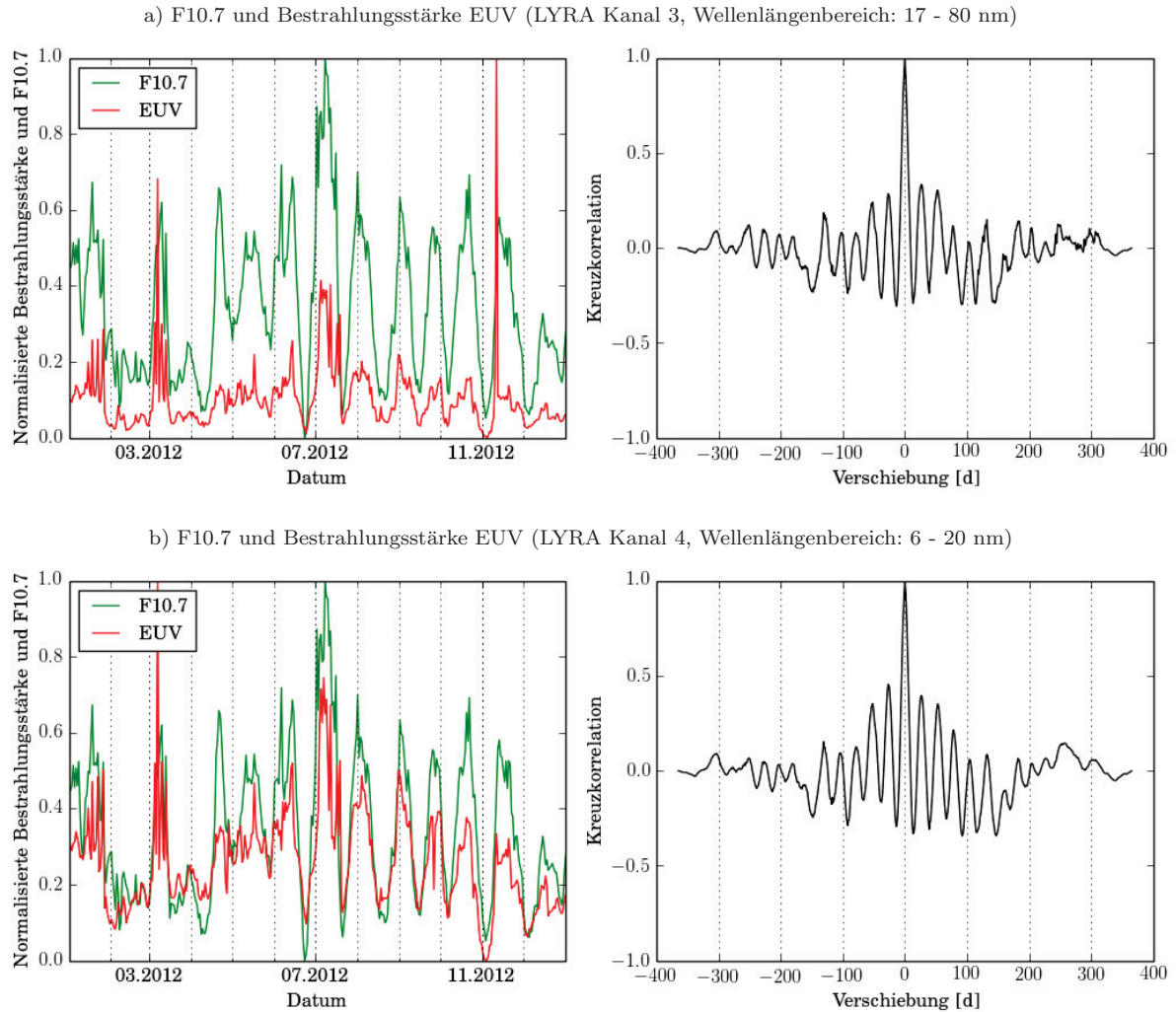


Abbildung 21: In der linken Abbildung ist der normalisierte Verlauf von F10.7 und der täglichen Mittel von EUV für das Jahr 2012 über 50°N und 10°E dargestellt. In der rechten Abbildung ist die zugehörige Kreuzkorrelation der Signale.

solare EUV-Strahlung ist, dass keine Verzögerung zwischen F10.7 und EUV-Strahlung vorliegt. Es kann daher ausgeschlossen werden, dass die Verzögerung, die in JAKOWSKI et al. [1994] festgestellt wurde, durch Unterschiede von F10.7 und EUV-Strahlung bedingt ist.

## 9 Solare EUV-Strahlung und TEC

Für die Analyse der räumlichen und zeitlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung werden die TEC-Daten von UPC (globale TEC-Karten) mit den drei verfügbaren Bändern von GOES sowie Kanal 3 und 4 von LYRA ausgewertet. Hierbei wird ein Zeitraum von etwa 20 Monaten (Februar 2012 bis September 2013) betrachtet.

Ob ein Zusammenhang zwischen den TEC-Daten und einem bestimmten Wellenlängenbereich der EUV-Strahlung vorliegt, lässt sich wie zum Beispiel in Abbildung 22 zunächst für einen gewählten Punkt (feste geografische Breite und Länge) bestimmen. In einem solchen Punkt verändern sich TEC und die Bestrahlungsstärke von EUV zeitlich. Eine Abhängigkeit zwischen beiden Signalen lässt sich über die Kreuzkorrelation aufzeigen, aus welcher ebenfalls eine zeitliche Verschiebung ermittelt werden kann. Die zeitliche Auflösung, in der die Verzögerung bestimmt werden kann, richtet sich nach den Eingangsdaten. Da die TEC-Daten in 1h-Auflösung vorliegen, werden die EUV-Daten mit 1min-Auflösung gemittelt. Weiterhin muss je nach gewählter geografischer Länge die Umrechnung in die lokale Zeit berücksichtigt werden.

Die Kreuzkorrelationen mit GOES EUVA in Abbildung 22a, GOES EUVB in Abbildung 22b und LYRA Kanal 4 in Abbildung 23b ähneln sich in ihrem Verlauf und haben eine Verschiebung von 22, 20 beziehungsweise 19 h. In allen Fällen ist der 27-Tage-Sonnenzyklus und die tägliche Variation zu erkennen, wobei die Schwankung durch den 27-Tage-Sonnenzyklus stärker ausgeprägt ist. Bei der Kreuzkorrelation mit GOES EUVE in Abbildung 22c ist die Korrelation nicht eindeutig und es liegt nur ein lokales Maximum bei 18 h vor. Die Untersuchung mit GOES EUVE unterscheidet sich zudem von den anderen durch einen größeren Einfluss der täglichen Variation. Die Kreuzkorrelation mit LYRA Kanal 3 in Abbildung 23a mit einem Maximum bei 17 h ähnelt mehr den Kanälen der niedrigen Wellenlängenbereiche, hat jedoch einen stärkeren Einfluss des Tagesgangs. Die Unterschiede in den Kreuzkorrelation sind auf die verschiedenen Höhen, bis zu denen die jeweiligen Wellenlängenbereiche eindringen, zurückzuführen. EUV-Strahlung im Wellenlängenbereich unter 80 nm verursacht die Ionisation von atomarem Sauerstoff und Stickstoff in der F-Schicht (auch in der E-Schicht im Wellenlängenbereich von 80 bis 102.7 nm), weshalb GOES EUVA und EUVB sowie LYRA Kanal 3 und 4, die alle in diesem Bereich liegen, das gleiche Verhalten in der Kreuzkorrelation aufzeigen. GOES EUVE hingegen liegt deutlich über diesen Wellenlängenbereich und ist der D-Schicht zuzuordnen, in der ein Wellenlängenbereich die Ionisation bestimmt, der



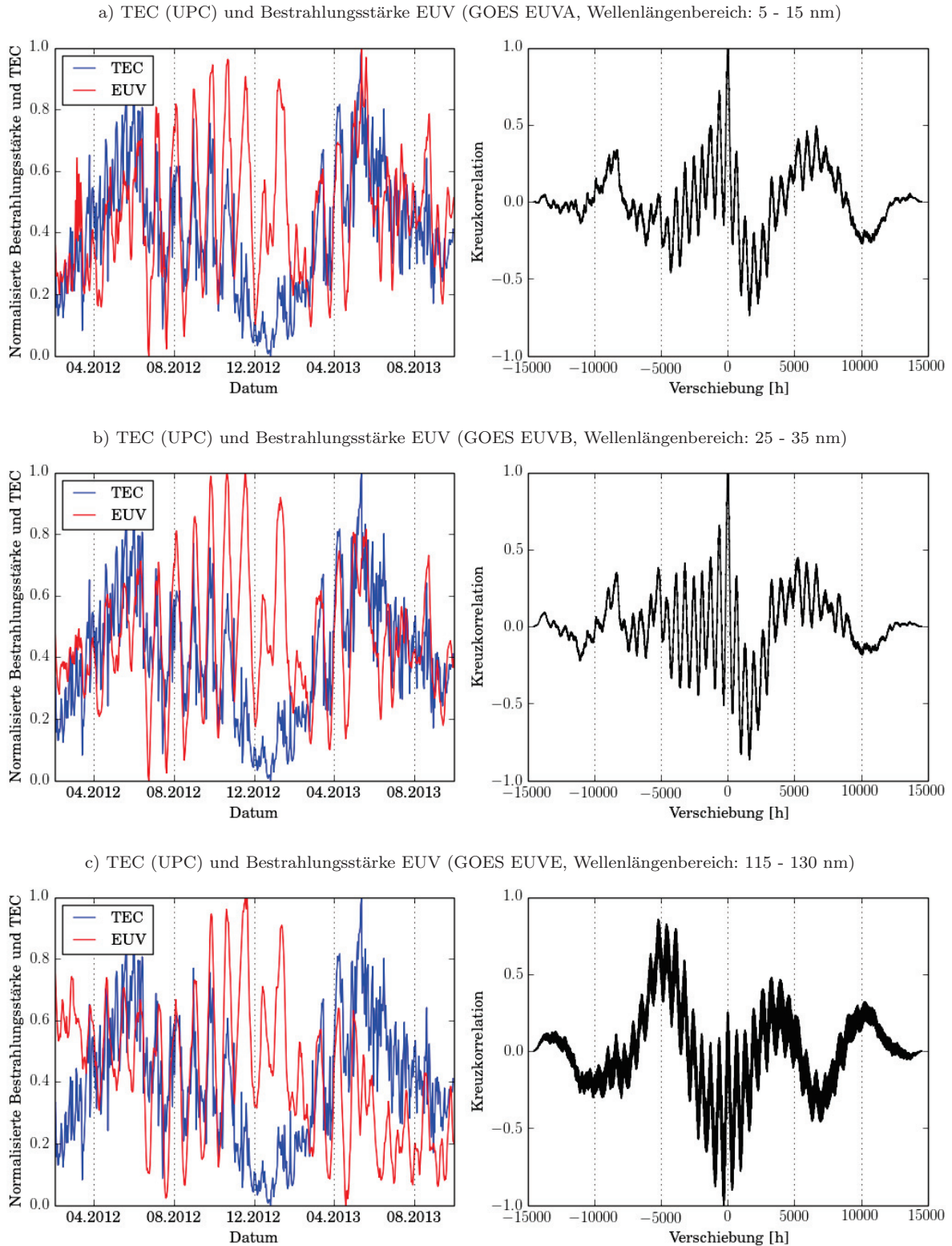


Abbildung 22: In der linken Abbildung ist der normalisierte Verlauf der täglichen Mittel von TEC und EUV vom 02.02.2012 bis 30.09.2013 über 50°N und 10°E dargestellt. In der rechten Abbildung ist die zugehörige Kreuzkorrelation der Signale.

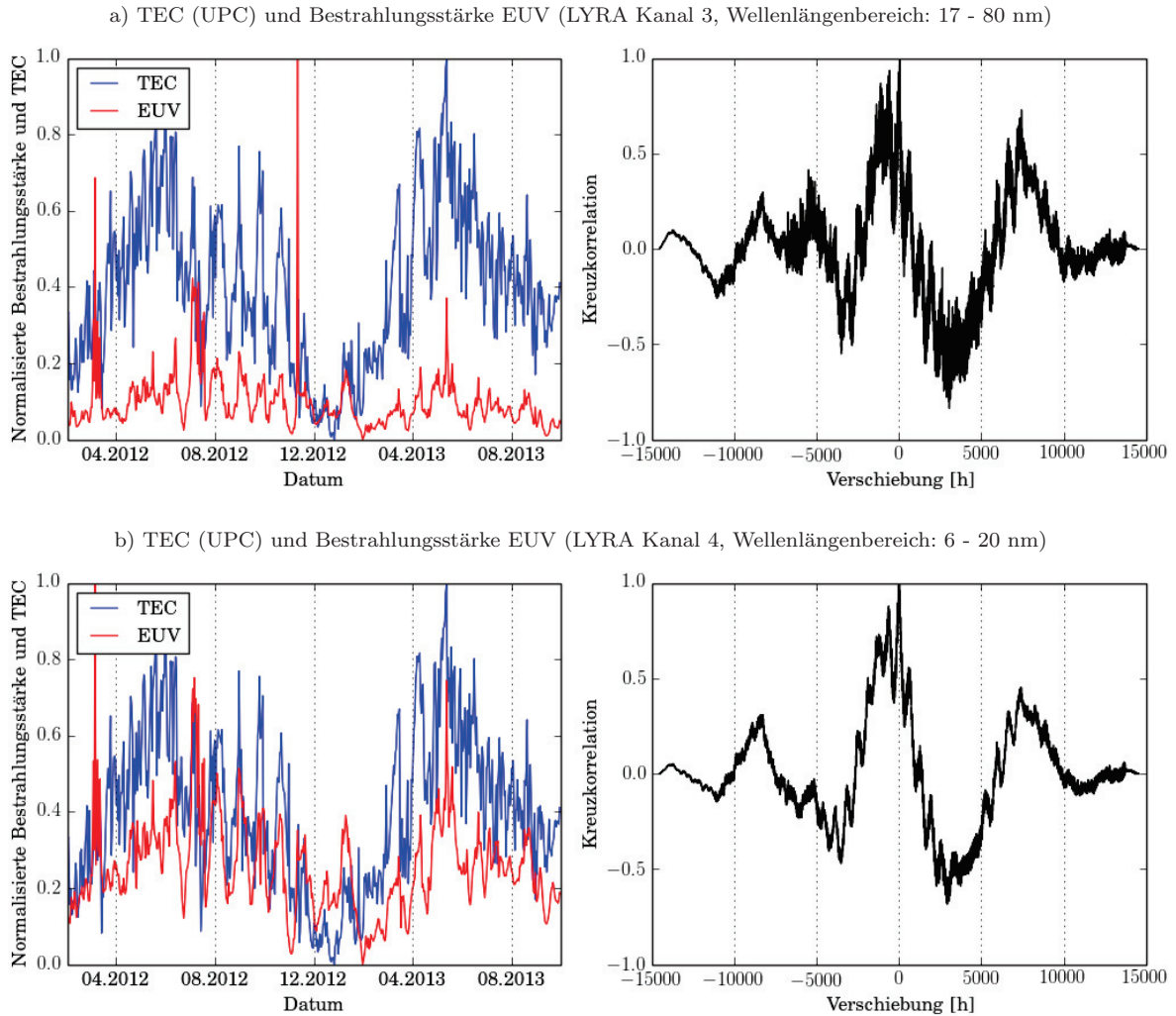


Abbildung 23: In der linken Abbildung ist der normalisierte Verlauf der täglichen Mittel von TEC und EUV vom 02.02.2012 bis 30.09.2013 über 50°N und 10°E dargestellt. In der rechten Abbildung ist die zugehörige Kreuzkorrelation der Signale.

auch die Lyman-Alpha-Spektrallinie enthält. Die zugehörige Strahlung ionisiert hauptsächlich Stickstoffmonoxid.

Unter Berücksichtigung der Zusammenhänge von EUV mit verschiedenen Indizes, wie zum Beispiel in DE WIT et al. [2009], WINTOFT [2011] oder UNGLAUB et al. [2011] beschrieben, und den im Rahmen dieser Arbeit festgestellten, verzögerungsfreien Zusammenhang von vorliegenden F10.7- und EUV-Daten, kann die verzögerte Reaktion der Ionosphäre, die zum Beispiel von JAKOWSKI et al. [1991], JAKOWSKI et al. [1994], OINATS et al. [2008] oder KUTIEV et al. [2013] mit verschiedenen Indizes ermittelt wurde, beim Vergleich von TEC- und EUV-Daten bestätigt werden.

Die Feststellung eines Zusammenhangs zwischen TEC und EUV ermöglicht eine räumliche Analyse der zeitlichen Verzögerung. Durch Bestimmung der Verzögerung für jeden vorhandenen Punkt bei Berücksichtigung der lokalen Zeit lässt sich eine Karte erstellen, in der über eine lineare Interpolation die Unterschiede herausgestellt werden.

Nach Abbildung 24, Abbildung 25 und Abbildung 26 schwankt die Verzögerung im gewählten Bereich ( $0^{\circ}\text{N}$  bis  $62.5^{\circ}\text{N}$  sowie  $15^{\circ}\text{W}$  bis  $15^{\circ}\text{E}$ ) nur um wenige Stunden (2 bis 3 h). In Abbildung 25 und Abbildung 26 ist zudem zu erkennen, dass bei der Analyse für den Wellenlängenbereich von GOES EUVB und EUVE in Nord-Süd-Richtung ein Trend für die Verzögerung vorliegt. Mit zunehmender geografischer Breite wird die Verzögerung kleiner. Über die geografische Länge ist hingegen kein Trend erkennbar.

Wie die Interpretation der verzögerten Reaktion der Ionosphäre selbst, ist auch die räumliche Variation wahrscheinlich nur durch das komplexe Wirken von thermosphärischen und ionosphärischen Prozessen zu erklären. Wie beispielsweise in JAKOWSKI et al. [1994] beschrieben, muss berücksichtigt werden, dass die einfallende Strahlung nicht nur Ionisation auslöst, sondern auch andere Prozesse wie Dissoziation und Erwärmung bewirkt. Die verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf die Änderung der solaren Aktivität und der aufgezeigte Trend in Nord-Süd-Richtung würden demnach die Folge von Umwandlungs-, Transport- und Speicherprozessen sein oder zumindest deren Einfluss unterliegen.

Aufgrund der Unabhängigkeit zur geografischen Länge lässt sich die Verzögerung für geografische Breiten mitteln und damit der Trend in Nord-Süd-Richtung für die verschiedenen EUV-Daten bestimmen. Der gemittelte Verlauf der zeitlichen Verzögerung (siehe Abbildung 27) hat in GOES EUVA, EUVB wie auch EUVE eine erkennbare Abnahme der Verzögerung bei etwa  $30^{\circ}\text{N}$  und ist für größere Breiten etwa konstant. Die Abnahme der Verzögerung ist in GOES EUVE wesentlich stärker, sodass erneut ein Unterschied in den verschiedenen Wellenlängenbereichen vorliegt. Die größere Abnahme der Verzöge-

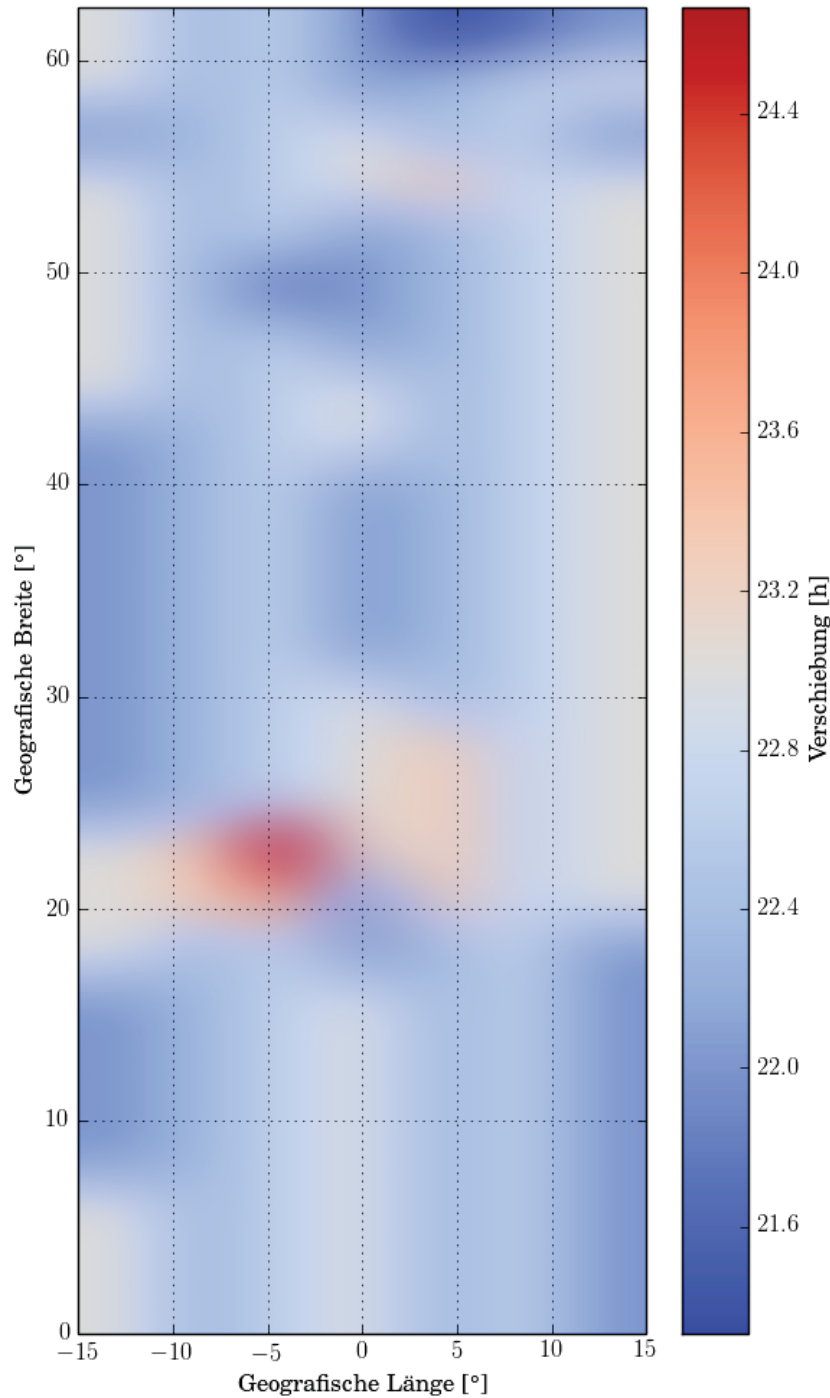


Abbildung 24: Durch die Kreuzkorrelation von TEC- und EUV-Daten kann für jeden gegebenen Punkt die zeitliche Verschiebung ermittelt werden. Die Karte zeigt die zeitliche Verschiebung in dem Bereich zwischen 0°N und 62.5°N sowie 15°W und 15°E. Eingangsdaten sind TEC (UPC) und Bestrahlungsstärke von EUV (GOES EUVA, Wellenlängenbereich: 5 - 15 nm) im Zeitraum von Februar 2012 bis September 2013.

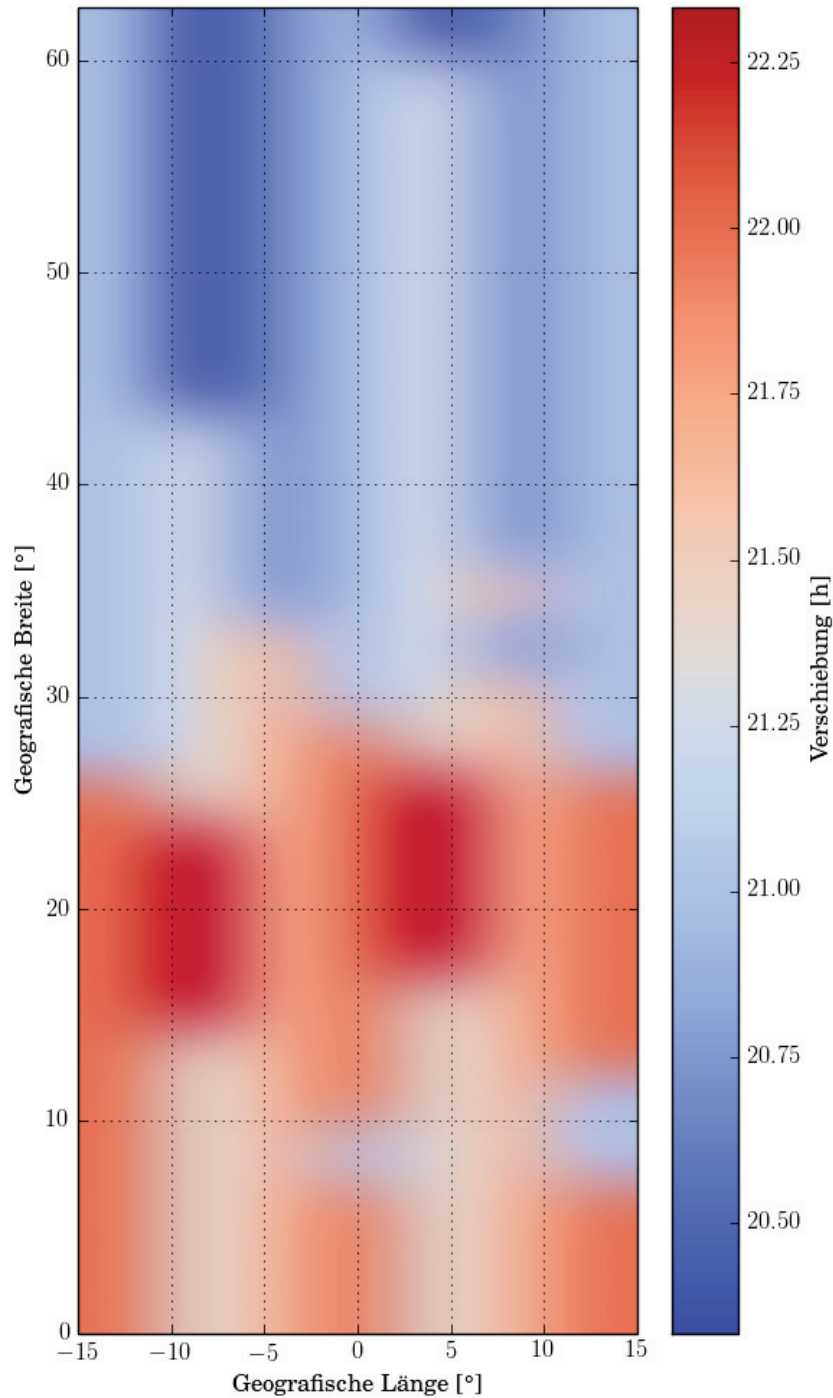


Abbildung 25: Durch die Kreuzkorrelation von TEC- und EUV-Daten kann für jeden gegebenen Punkt die zeitliche Verschiebung ermittelt werden. Die Karte zeigt die zeitliche Verschiebung in dem Bereich zwischen 0°N und 62.5°N sowie 15°W und 15°E. Eingangsdaten sind TEC (UPC) und Bestrahlungsstärke von EUV (GOES EUVB, Wellenlängenbereich: 25 - 35 nm) im Zeitraum von Februar 2012 bis September 2013.

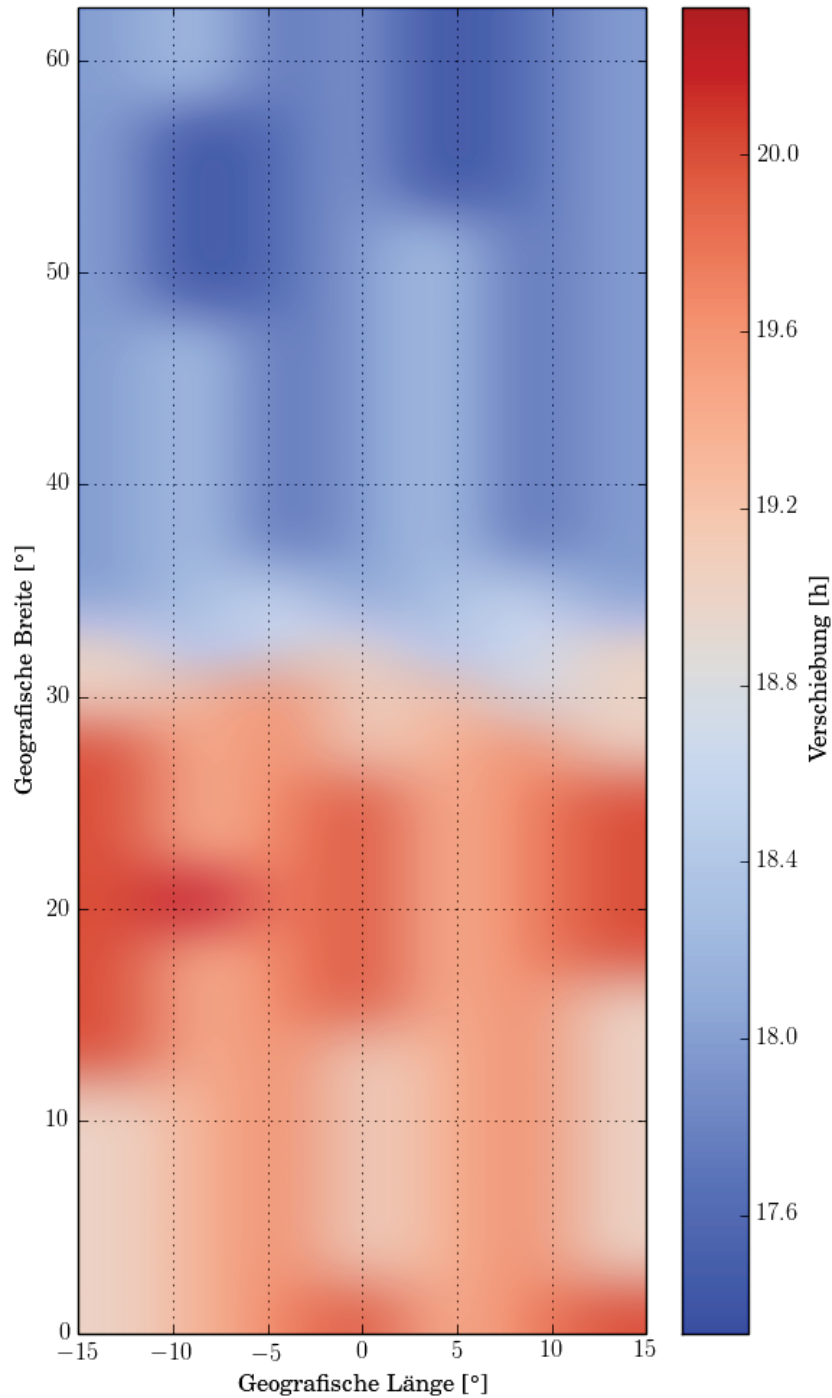


Abbildung 26: Durch die Kreuzkorrelation von TEC- und EUV-Daten kann für jeden gegebenen Punkt die zeitliche Verschiebung ermittelt werden. Die Karte zeigt die zeitliche Verschiebung in dem Bereich zwischen 0°N und 62.5°N sowie 15°W und 15°E. Eingangsdaten sind TEC (UPC) und Bestrahlungsstärke von EUV (GOES EUVE, Wellenlängenbereich: 115 - 130 nm) im Zeitraum von Februar 2012 bis September 2013.

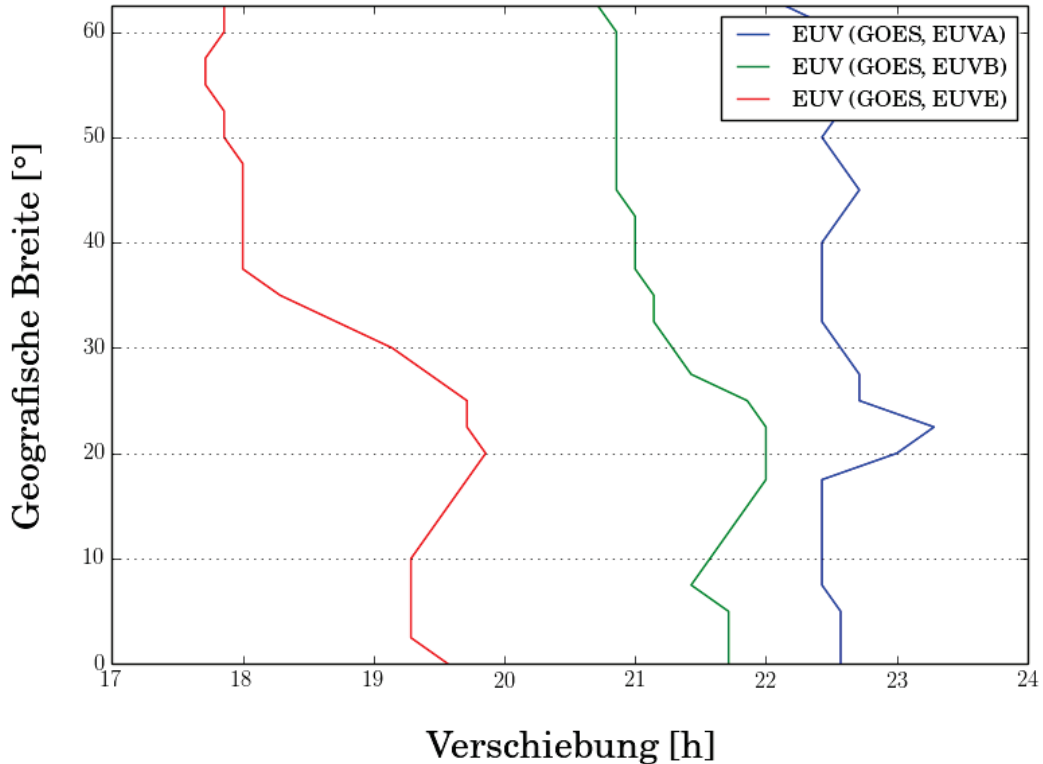


Abbildung 27: Durch die Kreuzkorrelation von TEC- und EUV-Daten kann für jeden gegebenen Punkt eines Bereiches die zeitliche Verschiebung ermittelt werden. Durch die Bestimmung der Mittelwerte für die Breitengrade ergibt sich ein gemittelter Verlauf in Nord-Süd-Richtung. Eingangsdaten sind ein Bereich zwischen  $0^{\circ}\text{N}$  und  $62.5^{\circ}\text{N}$  sowie  $15^{\circ}\text{W}$  und  $15^{\circ}\text{E}$  für TEC (UPC) und Bestrahlungsstärke von EUV (GOES EUVA, EUVB und EUVE).

Die Korrelation bei GOES EUVE muss kritisch betrachtet werden. Dies wird durch den Vergleich der Korrelationskoeffizienten (siehe Abbildung 28) deutlich, deren Verlauf sich ebenfalls in Nord-Süd-Richtung aufzeigen lässt. Während für die niedrigen Wellenlängenbereiche, also GOES EUVA und EUVB sowie LYRA Kanal 3, der Korrelationskoeffizient nach Norden größer wird, ist der Wert für den größeren Wellenlängenbereich, also GOES EUVE, für Breiten größer als  $30^{\circ}\text{N}$  im negativen Bereich und in etwa Null. Weiterhin ergibt sich für GOES EUVA und EUVB ein Minimum der Korrelation bei etwa  $10^{\circ}\text{N}$ .

Zusammenfassend kann also für jene Wellenlängenbereiche, die Ionisation in der F-Schicht bewirken, eine verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf solare Aktivität festgestellt werden. Der Zusammenhang nimmt dabei vom Äquator aus bis zu einer geogra-

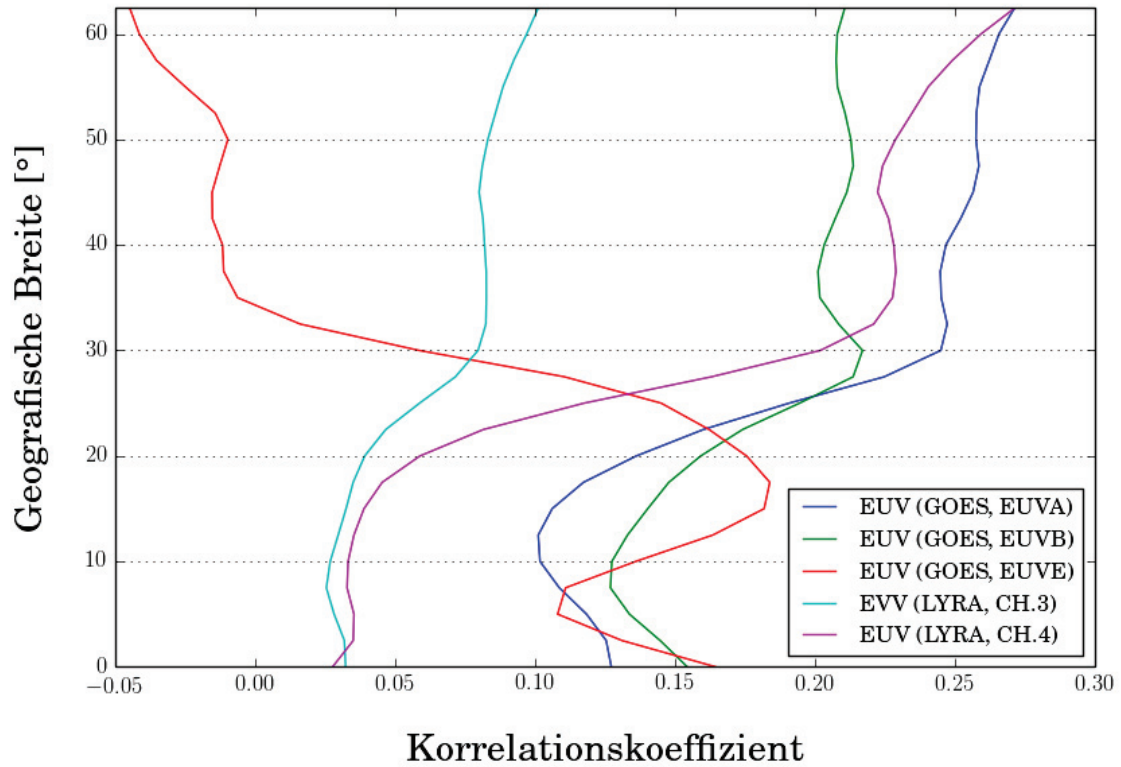


Abbildung 28: In einem gegebenen Bereich lässt sich für jeden gegebenen Punkt der Korrelationskoeffizient zwischen TEC- und EUV-Daten bestimmen. Durch die Bestimmung der Mittelwerte für die Breitengrade ergibt sich ein gemittelter Verlauf in Nord-Süd-Richtung. Eingangsdaten sind ein Bereich zwischen 0°N und 62.5°N sowie 15°W und 15°E für TEC (UPC) und Bestrahlungsstärke von EUV (GOES EUVA, EUVB und EUVE sowie LYRA Kanal 3 und 4).



fischen Breite von  $30^\circ\text{N}$  zu und ist für größere Breiten etwa konstant. Als Ursache für die auftretenden Unterschiede kommen physikalische oder chemische Prozesse in der F-Schicht infrage, die nur in der Nähe des Äquators wirken. Ein entscheidendes Phänomen in dieser Region ist die äquatoriale Anomalie. Diese Anomalie, deren Einfluss zum Beispiel in RASTOGI und KLOBUCHAR [1990] beschrieben wird, verursacht größere Ströme von Plasma entlang der magnetischen Feldlinien des Erdmagnetfeldes vom Äquator weg. Die Ursache für den Transport sind meridionale Winde am Äquator, die weiterhin die Herausbildung eines Maximums der Ionisation in jeder Hemisphäre bewirken [ANDERSON und ROBLE, 1981]. Ein Minimum in der Nähe des Äquators tritt bei der Korrelation von TEC- und betreffenden EUV-Daten für die nördliche Hemisphäre auf. Somit könnte die Anomalie einer der Prozesse sein, welche die verzögerte Reaktion der Ionosphäre im Bereich des Äquators beeinflussen. In mittleren Breiten ist die Häufigkeit und Stärke von ionosphärischen Störungen geringer; dies stimmt gut mit dem etwa konstanten Verlauf des Korrelationskoeffizienten für TEC- und EUV-Daten in diesem Bereich überein. Bei der Erklärung der verzögerten Reaktion der Ionosphäre müssen demnach verschiedene Interaktionen von Ionosphäre, Thermosphäre und Magnetosphäre neben der solaren Aktivität berücksichtigt werden.

Der Verlauf der Verzögerung in Nord-Süd-Richtung für Wellenlängenbereiche, die Ionisation in der F-Schicht bewirken, hat ebenfalls einen Übergang bei etwa  $30^\circ\text{N}$ . Dieser ist jedoch schwächer ausgeprägt.

Bei dem Zusammenhang von solarer EUV-Strahlung und Ionisation der D-Schicht müssen weitere Faktoren berücksichtigt werden. Die D-Schicht wird mehr als die höheren Schichten durch chemische Prozesse bestimmt, an denen hauptsächlich molekulare Ionen und neutrale Gase beteiligt sind. Weiterhin treten unterhalb von 85 km Höhe Wasser-Clusterionen auf und haben einen Einfluss auf ablaufende Prozesse. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die zugehörige Korrelation mit GOES EUVE und TEC starken Schwankungen für geografische Breiten kleiner als  $30^\circ\text{N}$  oberhalb des Äquators unterliegt. Für größere Breiten ist die Korrelation in etwa Null, weshalb kein linearer Zusammenhang mehr vorliegen kann.

## **10 Ergebnisse im Hinblick auf potentielle Verbesserungsmöglichkeiten der Ionosphärenmodellierung**

Im Folgenden werden mögliche Verbesserungen zur Erstellung von TEC-Karten und Ionosphärenmodellierung vorgeschlagen, die auf den Erkenntnissen aus Vorbereitung und Durchführung der Analyse beruhen.

### **10.1 Qualitätsverbesserung von TEC-Karten**

Die Auswahl der TEC-Daten für die Analyse der zeitlichen und räumlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung hat Stärken und Schwächen der verschiedenen TEC-Karten aufgezeigt.

Um das Verhalten der Ionosphäre mit TEC wiedergeben zu können, ist die Vollständigkeit im zeitlichen Verlauf ein wichtiges Kriterium an die TEC-Karten. Jedoch treten in allen untersuchten Datensätzen Lücken auf, die problematisch für die Analyse sind, wenn sie sich über einen zu großen Zeitraum erstrecken oder innerhalb eines bestimmten Zeitraums zu häufig auftreten. Da die Entstehung von Lücken (zum Beispiel durch den Ausfall des operationellen Dienstes) nicht ausgeschlossen werden kann, könnte im Rahmen der SWACI TEC-Karten ein nachträgliches Prozessieren zum Schließen der Lücken durchgeführt werden. Mit einer solchen Nachbearbeitung könnten die Daten, welche für Anwendungen erstellt werden, die in nahezu Echtzeit Korrekturen benötigen, überarbeitet werden, ohne das bisherige Verfahren zu beeinträchtigen.

Die Nachbearbeitung der Daten könnte ein weiteres Problem der SWACI TEC-Karten lösen. Um Mitternacht treten Sprünge oder Rauschen im TEC auf, da sich das Modell mit den Daten des vergangenen Tages neu einstellt. Im Rahmen eines nachträglichen Prozessierens könnten die Sprünge durch das Glätten des TEC behoben werden. Ob eine solche Lösung für den operationellen Dienst möglich ist, hängt davon ab, wie groß die zusätzliche Berechnungszeit ist und wie sich das Glätten der Daten in das bisherige Verfahren einbinden lässt. Da der Zeitpunkt der Sprünge bekannt ist, könnte auch nur für diese begrenzten Zeiträume eine Anpassung vorgenommen werden.

Wie in Kapitel 8.5 erwähnt, sind die TEC-Werte für nördliche Regionen in den SWACI TEC-Karten zu klein. Die Ursache für dieses Verhalten ist die geringe Anzahl an Referenzstation im Norden. Dies führt zu großen Bereichen am oberen Rand der TEC-Karten, in denen auch mit dem Modell eine korrekte Bestimmung der TEC-Werte nicht

gelingt. Die Lösung für das Problem wäre die Bereitstellung weiterer Referenzstationen, um mehr Beobachtungen in das Verfahren einzubringen. Weiterhin könnten die auftretenden Abweichungen genauer betrachtet werden; das heißt, wie sich die SWACI TEC-Karten mit zunehmenden Breiten in Vergleich zu anderen TEC-Karten oder Beobachtungen durch Referenzstationen verhalten. Eine Beschreibung der Abweichungen könnte eventuell für die Anpassung des Modells genutzt werden, sodass auf diesem Weg der TEC korrekt ermittelt wird.

## 10.2 Vorschläge zur Optimierung von Modellen

Im Rahmen der Arbeit wurde zunächst der Zusammenhang von EUV-Daten und F10.7 untersucht. Hierbei wurde festgestellt, dass sich der F10.7 gut eignet, die mittelfristigen Variationen der solaren Aktivität in ihrem zeitlichen Verlauf zu beschreiben. Wie zu erwarten, kann der Index jedoch nicht die verschiedenen Bestrahlungsstärken und kurzfristigen Änderungen in den unterschiedlichen Wellenlängenbereichen der EUV-Strahlung abbilden. Ob bei der Berücksichtigung der solaren Aktivität in Ionosphärenmodellen Beobachtungen der EUV-Strahlung oder der F10.7 verwendet werden, sollte demnach von der Zielstellung des jeweiligen Modells abhängig gemacht werden.

Der Vergleich von TEC und EUV hat wiederum aufgezeigt, wie komplex der Einfluss der solaren EUV-Strahlung auf die Ionosphäre ist. Abhängig von der geografischen Breite und Wellenlänge der eintreffenden Strahlung werden bestimmte Schichten der Ionosphäre unterschiedlich stark ionisiert. Von den gleichen Faktoren hängt ab, ob eine Verzögerung zwischen Änderungen der EUV-Strahlung und Reaktion der Ionosphäre auf diese Änderung auftritt. Bei der Modellierung der Ionosphäre können diese Erkenntnisse helfen, den Einfluss der solaren Strahlung im Vergleich zu anderen Prozessen einzuordnen und Verknüpfungen untereinander herzustellen. Die Verzögerung ist zudem interessant für Vorhersagen von TEC-Werten und anderen Parametern der Ionosphäre, da die Information über den Trend der EUV-Strahlung vorliegt, bevor die Änderungen in der Ionosphäre auftreten. Zu Zeiten, in denen keine Sonneneruptionen oder koronalen Massenauswürfe stattfinden, könnte eine genauere Vorhersage erreicht werden.

In Hinblick auf GNSS mit der Anforderung, Positionsbestimmungen so präzise wie möglich durchzuführen, müssen auch verlässliche Korrekturen für die Ausbreitungsfehler bereitgestellt werden. Dies wiederum erfordert eine realitätsnahe Modellierung der Ionosphäre, die die solare Aktivität berücksichtigt. Im Moment wird diese Forderung mithilfe des F10.7 erfüllt, der aber bei weitem nicht die Informationen enthält, die Beobachtungen der EUV-Strahlung liefern. Eine Modellierung, die sich an der Strahlung orientiert,

die entscheidende Prozesse in der Ionosphäre steuert, würde letztendlich unterstützen, die Anforderungen an Positionsbestimmungen zu erfüllen. Dies erfordert allerdings, die Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung genauer zu verstehen und zu beschreiben.

## 11 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Untersuchung der zeitlichen und räumlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung wurde eine ausführliche Analyse der vorliegenden Daten vorgenommen, um anschließend die verschiedenen Beobachtungen gegenüberstellen zu können.

Bei der Untersuchung der Missionen, die den EUV-Fluss beobachten, stellten sich die Daten von GOES und PROBA2 (LYRA) als geeignet heraus. In der Analyse konnten dadurch verschiedene Wellenlängenbereiche der EUV-Strahlung berücksichtigt werden. Beim Vergleich der verschiedenen TEC-Daten blieben aufgrund der angestrebten zeitlichen Auflösung die SWACI, UPC und ESA TEC-Karten in der Auswahl. Durch den Vergleich der TEC-Karten untereinander stellte sich heraus, dass die UPC TEC-Karten am besten für die folgenden Untersuchungen geeignet waren.

Ausgehend von den Arbeiten JAKOWSKI et al. [1991] oder JAKOWSKI et al. [1994] zur Reaktion der Ionosphäre auf solare Variationen mit F10.7 und TEC war die offene Frage nach der Korrelation zwischen F10.7 und der EUV-Strahlung zu klären. Bei diesem Vergleich zeigten sich eine gute Korrelation und keine Verzögerung zwischen beiden Signalen. Durch diese Erkenntnisse konnte ausgeschlossen werden, dass die in JAKOWSKI et al. [1994] festgestellte verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf solare Aktivität auf einem Unterschied des F10.7 zur solaren EUV-Strahlung beruht.

Der Vergleich von EUV- und TEC-Daten zeigte auf, dass der TEC mit jenen Wellenlängenbereichen gut korreliert, die in der F-Schicht die Photoionisation steuern. Die Wellenlängenbereiche, die in der D-Schicht Ionisation verursachen, korrelieren hingegen deutlich schlechter mit TEC. Weiterhin konnte auch ein räumlicher Zusammenhang für die Korrelation zwischen TEC und die EUV-Strahlung, die hauptsächlich in der F-Schicht absorbiert wird, festgestellt werden. In mittleren Breiten ist der ermittelte Korrelationskoeffizient nahezu konstant. In äquatorialen Bereichen ist der Korrelationskoeffizient geringer und hat ein Minimum oberhalb des Äquators. Die Unterschiede sind mit Störungen erklärbar, die nur in der Nähe des Äquators auftreten und zum Beispiel auf Wechselwirkungen mit der Thermosphäre sowie der Magnetosphäre beruhen. Diese Wechselwirkungen beeinflussen die Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung.

Die Untersuchung konnte auch die Verzögerung der Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung bestätigen, wobei für alle Wellenlängenbereiche unterhalb von 80 nm eine Zeitspanne von etwa 20 h zwischen Änderung des EUV und resultierender Re-

aktion der Ionosphäre bestimmt wurde. Räumliche Unterschiede wurden ebenfalls für die verzögerte Reaktion festgestellt, die den Unterschieden des Korrelationskoeffizienten ähneln. Die ermittelten Variationen zwischen äquatorialen Bereichen und mittleren Breiten sind jedoch sehr gering.

Das nächste Ziel für die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare EUV-Strahlung sollte die Untersuchungen der Korrelation in verschiedenen Jahreszeiten sein, um festzustellen, ob sich die Reaktion der Ionosphäre im Laufe eines Jahres verändert. Zudem könnte die Untersuchung so angepasst werden, dass nur die maximale Ionisationsphase eines Tages (um die Mittagszeit) in der Analyse berücksichtigt wird. Durch diese Änderung würden die Zeitspannen entfallen, in denen die EUV-Strahlung keinen Einfluss auf die Ionosphäre hat. Eine weitere Überlegung zur Verbesserung der Untersuchungsergebnisse zielt auf die Vorbereitung der Daten für die Gegenüberstellung. Die Kombination der vorliegenden Daten, also zum Beispiel der SWACI und IGS TEC-Karten, könnte genutzt werden, um Lücken in den Daten zu schließen und Ausreißer zu entfernen.

Die verzögerte Reaktion der Ionosphäre auf solare EUV-Strahlung ist ein wichtiger Aspekt, um die mittelfristigen Änderungen der Ionosphäre beschreiben zu können. Zudem ist eine genaue Beschreibung der Reaktion wünschenswert, wenn es um die Berücksichtigung der solaren Aktivität in der TEC-Modellierung und TEC-Vorhersage geht. Aus diesen Gründen und der vorliegenden Komplexität, also der Überlagerung mit anderen physikalischen und chemischen Prozessen, ist eine weitere Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Reaktion der Ionosphäre auf die solare Aktivität von entscheidender Bedeutung.

## Literatur

- ABDU, M. A. und D. PANCHEVA, Hrsg. (2011). *Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere*. Springer Science & Business Media.
- ANDERSON, D.N. und R. ROBLE (1981). *Neutral wind effects on the equatorial F-region ionosphere*. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 43:835–843.
- BARTELS, J. (1934). *Twenty-seven day recurrences in terrestrial-magnetic and solar activity*. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 39:201–202.
- BILITZA, D. (2014a). *The International Reference Ionosphere – Status 2013*. *Advances in Space Research*.
- BILITZA, D. (2014b). *IRI - International Reference Ionosphere*. <http://iri.gsfc.nasa.gov/>; Letzter Zugriff: 27.08.2014.
- BLAUNSTEIN, N. und E. PLOHOTNIUC (2008). *Ionosphere and applied aspects of radio communication and radar*. CRC Press.
- BORRIES, C. und J. BERDERMANN (2014). *Early Warning of ionospheric disturbances for GNSS users*.
- BREMER, J. (1998). *Trends in the ionospheric E and F regions over Europe*. *Annales Geophysicae*, 16:986–996.
- BURNS, C. J., E. TURUNEN, H. MATVEINEN, H. RANTA und J. K. HARGREAVES (1991). *Chemical modelling of the quiet summer D- and E-regions using EISCAT electron density profiles*. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 53:115–134.
- CAVENDISH, H. (1790). *On the Height of the Luminous Arch Which Was Seen on Feb. 23, 1784*. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 80:101.
- CHAKRABARTY, D., M. S. BAGIYA, S. V. THAMPI und K. N. IYER (2012). *Solar EUV flux (0.1-50 nm), F10.7 cm flux, sunspot number and the total electron content in the crest region of equatorial ionization anomaly during the deep minimum between solar cycle 23 and 24*. *Indian Journal of Radio & Space Physics*, 41:110–120.
- DAGLIS, I. A. (2006). *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*. Springer Science & Business Media.

- DANILOV, A. D. (2002). *Overview of the trends in the ionospheric E and F2 regions*. Physics and Chemistry of the Earth, 27:579–588.
- DAVIES, K. (1990). *Ionospheric Radio*. Institution of Engineering and Technology.
- DENTON, M. H., T. Ulich und E. TURUNEN (2009). *Modification of midlatitude ionospheric parameters in the F2 layer by persistent high-speed solar wind streams*. Space Weather, 7.
- DETWILER, C. R., D. L. GARRETT, J. P. PURCELL und R. TOUSEY (1961). *The intensity distribution in the ultraviolet solar spectrum*. Annales de Geophysique, 17:263.
- DONNELLY, R. F., J. W. HARVEY, D. F. HEATH und T. P. REPOFF (1985). *Temporal characteristics of the solar UV flux and He I line at 1083 nm*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 90:6267–6273.
- DONNELLY, R. F., D. F. HEATH, J. L. LEAN und G. J. ROTTMAN (1983). *Differences in the temporal variations of solar UV flux, 10.7-cm solar radio flux, sunspot number, and Ca-K plage data caused by solar rotation and active region evolution*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 88:9883–9888.
- DRAINE, B. T. (2010). *Physics of the Interstellar and Intergalactic Medium*. Princeton University Press.
- EDDY, J. A. (1979). *A New Sun: The Solar Results From Skylab*.
- EULER, L. (1746). *Recherches physiques sur la cause des queues comètes de la lumière boreale et de la lumière zodiacale*. Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
- FELTENS, J. und S. SCHAER (1998). *IGS products for the ionosphere*. In: *IGS Analysis Center Workshop*.
- FG, FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT (2014a). *Fraunhofer magazine 1.2014 - Sun in sight!*. [http://www.fraunhofer.de/en/publications/fraunhofer-magazine/magazine\\_2014/Fraunhofer-magazine\\_1-2014/magazine\\_1-2014\\_28.html](http://www.fraunhofer.de/en/publications/fraunhofer-magazine/magazine_2014/Fraunhofer-magazine_1-2014/magazine_1-2014_28.html); Letzter Zugriff: 24.07.2014.
- FG, FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT (2014b). *SolACES: Licht ins Dunkel der Sonnenstrahlung*. [http://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/AMS\\_Analysen\\_Messsysteme/IPM\\_Art\\_SolACES\\_dt\\_6\\_END.pdf](http://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/de/PDFs/produktblaetter/AMS_Analysen_Messsysteme/IPM_Art_SolACES_dt_6_END.pdf); Letzter Zugriff: 28.07.2014.



- FLOYD, L., J. NEWMARK, J. COOK und D. M. L. HERRINGA (2005). *Solar EUV and UV spectral irradiances and solar indices*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67:3–15.
- FULLER-ROWELL, T., S. SOLOMON, R. ROBLE und R. VIERECK (2013). *Impact of Solar EUV, XUV, and X-Ray Variations on Earth's Atmosphere*. Solar Variability and Its Effects on Climate.
- GAUSS, C. F. (1841). *Allgemeine Theorie des Erdmagnetismus*.
- GEODZ (2014). *GPS-Signalausbreitung - GeoLexikon*. <http://www.geodz.com/deu/d/GPS-Signalausbreitung>; Letzter Zugriff: 16.08.2014.
- GIOVANNI, G. DI und S. M. RADICELLA (1990). *An analytical model of the electron density profile in the ionosphere*. Advances in Space Research, 10:27–30.
- GROTHUES, H. G. (2013a). *SolACES – Ein selbstkalibrierendes EUV/UV-Spektrophotometer auf der Internationalen Raumstation ISS*. [http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2448/3635\\_read-5422/](http://www.dlr.de/rd/desktopdefault.aspx/tabid-2448/3635_read-5422/); Letzter Zugriff: 14.07.2014.
- GROTHUES, H. G. (2013b). *SolACES Datenblatt*. [http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/rx/SolACES\\_D\\_13\\_09.pdf](http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/rx/SolACES_D_13_09.pdf); Letzter Zugriff: 14.07.2014.
- HANSLMEIER, A. (2002). *The Sun and Space Weather*. Springer Science & Business Media.
- HEISE, S. (2002). *Rekonstruktion dreidimensionaler Elektronendichteverteilungen basierend auf CHAMP-GPS-Messungen*. Doktorarbeit, Freie Universität Berlin, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften.
- HERNÁNDEZ-PAJARES, M., J. M. JUAN, J. SANZ, R. ORUS, A. GARCIA-RIGO, J. FELTENS, A. KOMJATHY, S. C. SCHAEER und A. KRANKOWSKI (2009). *The IGS VTEC maps: a reliable source of ionospheric information since 1998*. Journal of Geodesy, 89:263–275.
- HEWITT, C. N. und A. V. JACKSON (2007). *Handbook of Atmospheric Science: Principles and Applications*. Blackwell.

- HINTEREGGER, H. E., K. FUKUI und B. R. GILSON (1981). *Observational, reference and model data on solar EUV, from measurements on AE-E*. Geophysical Research Letters, 8:1147–1150.
- HOFMANN-WELLENHOF, B., H. LICHTENEGGER und J. COLLINS (1997). *Global Positioning System: theory and practice*. Springer.
- HOQUE, M. M. und N. JAKOWSKI (2010). *Higher order ionospheric propagation effects on GPS radio occultation signals*. Advances in Space Research, 46:162–173.
- JACOBSON, M. Z. (2005). *Fundamentals of Atmospheric Modeling*. Cambridge University Press.
- JAKOWSKI, N. (1996). *TEC monitoring by using satellite positioning systems, in Modern Ionospheric Science*. Modern Ionospheric Science, S. 371–390.
- JAKOWSKI, N., B. FICHELTMANN und A. JUNGSTAND (1991). *Solar activity control of ionospheric and thermospheric processes*. Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 53:1125–1130.
- JAKOWSKI, N., B. FICHELTMANN, R. LEITINGER, E. PUTZ und G. K. HARTMANN (1994). *Zur Abhängigkeit der Gesamtelektronenzahl der Ionosphäre von Solarstrahlungsvariationen*. In: *Kleinheubacher Berichte*, S. 413–420.
- JAKOWSKI, N., M. M. HOQUE und C. MAYER (2011a). *A new global TEC model for estimating transionospheric radio wave propagation errors*. Journal of Geodesy, 85.
- JAKOWSKI, N., C. MAYER, M. M. HOQUE und V. WILKEN (2011b). *Total electron content models and their use in ionosphere monitoring*. Radio Science, 46.
- JUAN, J. M., A. RIUS, M. HERNÁNDEZ-PAJARES und J. SANZ (1997). *A two-layer model of the ionosphere using Global Positioning System data*. Geophysical Research Letters, 24:393–396.
- KANE, R. P. (2005). *Hysteresis and non-linearity between solar EUV and 10.7 cm fluxes*. Indian Journal of Radio & Space Physics, 34:161–170.
- KELLEY, M. C. (2009). *The Earth's Ionosphere - Plasma Physics and Electrodynamics*. Academic Press.

- KLOBUCHAR, J. A. (1987). *Ionospheric Time-Delay Algorithm for Single-Frequency GPS Users*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, AES-23:325–331.
- KUTIEV, I., I. TSAGOURI, L. PERRONE, D. PANCHEVA, P. MUKHTAROV, A. MIKHAILOV, J. LAŠTOVIČKA, N. JAKOWSKI, D. BURESOVA, E. BLANCH, B. ANDONOV, D. ALTADILL, S. MAGDALENO, M. PARISI und J. M. TORTA (2013). *Solar activity impact on the Earth's upper atmosphere*. Journal of Space Weather Space and Space Climate.
- LANG, K. R. (2010). *NASA's Cosmos - 6. Perpetual Change*. [http://ase.tufts.edu/cosmos/print\\_images.asp?id=28](http://ase.tufts.edu/cosmos/print_images.asp?id=28); Letzter Zugriff: 24.07.2014.
- LASP (2013a). *EUV Variability Experiment - Instrument*. <http://lasp.colorado.edu/home/eve/science/instrument/>; Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- LASP (2013b). *Quick Facts: Solar Dynamics Observatory/EUV Variability Experiment (SDO/EVE)*. <http://lasp.colorado.edu/home/missions-projects/quick-facts-sdo-eve/>; Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- LAŠTOVIČKA, J. (2005). *On the role of solar and geomagnetic activity in long-term trends in the atmosphere–ionosphere system*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67:83–92.
- LEAN, J. L., O. R. WHITE, W. C. LIVINGSTON, D. F. HEATH, R. F. DONNELLY und A. SKUMANICH (1982). *A three-component model of the variability of the solar ultraviolet flux: 145–200 nm*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 87:10307–10317.
- LEI, J., J. P. THAYER, J. M. FORBES, E. K. SUTTON und R. S. NEREM (2008). *Rotating solar coronal holes and periodic modulation of the upper atmosphere*. Geophysical Research Letters, 35.
- LEMAIRE, J. F. und K. I. GRINGAUZ (2005). *The Earth's Plasmasphere*. Cambridge University Press.
- LÜHR, H. und S. MAUS (2006). *Direct observation of the F region dynamo currents and the spatial structure of the EEJ by CHAMP*. Geophysical Research Letters, 33.

- LILENSTEN, J. und J. BORNAREL (2006). *Space Weather - Environment and Societies*. Springer Science & Business Media.
- LODGE, O. (1902). *Mr. Marconi's results in day and night wireless telegraphy*. *Nature*, 66:222.
- MACHOL, J., R. VIERECK und A. JONES (2014). *GOES NOP EUV Data, v2*. [http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/doc/GOES\\_NOP\\_EUV\\_v2.pdf](http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/doc/GOES_NOP_EUV_v2.pdf); Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- MANNUCCI, A. J., B. D. WILSON, D. N. YUAN, C. H. HO, U. J. LINDQWISTER und T. F. RUNGE (1998). *A global mapping technique for GPS-derived ionospheric total electron content measurements*. *Radio Science*, 33:565–582.
- MANSFELD, W. (2009). *Satellitenortung und Navigation: Grundlagen, Wirkungsweise und Anwendung globaler Satellitennavigationssysteme*. Springer.
- MANSILLA, G. A. und M. M. ZOSSI (2013). *Ionospheric response to the 3 August 2010 geomagnetic storm at mid and mid-high latitudes*. *Advances in Space Research*, 51:50–60.
- MAUNDER, E. W. (1904). *Magnetic disturbance and associated sun-spots*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 65:2–34.
- MOLDWIN, M. (2008). *An Introduction to Space Weather*. Cambridge University Press.
- NASA, GODDARD SPACE FLIGHT CENTER (2014). *Sun Emits 3 X-class Flares in 2 Days*. <http://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011500/a011564/>; Letzter Zugriff: 24.07.2014.
- NAVA, B., P. COÏSSON und S. M. RADICELLA (2008). *A new version of the NeQuick ionosphere electron density model*. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70:1856–1862.
- NGDC, NATIONAL GEOPHYSICAL DATA CENTER (2014). *GOES Space Environment Monitor - Data describing the environment at geosynchronous orbit..* <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/goes/>; Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- OINATS, A.V., K. RATOVSKY und G. KOTOVICH (2008). *Influence of the 27-day solar flux variations on the ionosphere parameters measured at Irkutsk in 2003–2005*. *Advances in Space Research*, 42:639–644.

- PARK, J., H. LÜHR und K. W. MIN (2010). *Neutral density depletions associated with equatorial plasma bubbles as observed by the CHAMP satellite*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 72:157–163.
- PÉREZ, R. O. (2005). *Contributions on the improvement, assessment and application of the Global Ionospheric VTEC Maps computed with GPS data*. Doktorarbeit, Technical University of Catalonia.
- PRÖLSS, G. (2003). *Physik des erdnahen Weltraums: Eine Einführung*. Springer.
- RASTOGI, R. G. und J. A. KLOBUCHAR (1990). *Ionospheric electron content within the equatorial F2 layer anomaly belt*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 95:19045–19052.
- RATCLIFFE, J. A. (1972). *An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere*. Cambridge University Press.
- REES, M. H. (1989). *Physics and Chemistry of the Upper Atmosphere*. Cambridge University Press.
- RISHBETH, H. (1971). *The F-layer dynamo*. Planetary and Space Science, 19:263–267.
- ROB, ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM (2014a). *LYRA photometer*. <http://proba2.oma.be/about/LYRA>; Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- ROB, ROYAL OBSERVATORY OF BELGIUM (2014b). *The PROBA2 mission*. <http://proba2.oma.be/about/mission>; Letzter Zugriff: 28.07.2014.
- ROBLE, R. G., E. C. RIDLEY und R. E. DICKINSON (1987). *On the global mean structure of the thermosphere*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 92:8745–8758.
- ROTTMAN, G., L. FLOYD und R. VIERECK (2013). *Measurements of the Solar Ultraviolet Irradiance*. American Geophysical Union.
- SAHA, K. (2008). *The Earth's Atmosphere - Its Physics and Dynamics*. Springer Berlin Heidelberg.
- SCHAER, S. (1999). *Mapping and predicting the Earth's ionosphere using the Global Positioning System*. Geodaetisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz.

- SCHERER, K., H. FICHTNER, B. HEBER und U. MALL, Hrsg. (2005). *Space Weather - The Physics Behind a Slogan*. Springer.
- SCHUNK, R. W. und A. NAGY (2004). *Ionospheres - Physics, Plasma Physics and Chemistry*. Cambridge University Press.
- SCHWABE, S. H. (1843). *Die Sonne*. *Astronomische Nachrichten*, 20:280.
- SDO, SOLAR DYNAMICS OBSERVATORY (2014). *SDO Science - What is Solar Irradiance?*. <http://sdo.gsfc.nasa.gov/mission/science.php>; Letzter Zugriff: 24.07.2014.
- SOLOMON, S. C. und L. QIAN (2005). *Solar extreme-ultraviolet irradiance for general circulation models*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 110.
- STEWART, B. (1882). *Aurora Borealis*. *Encyclopaedia Britannica*.
- TAYLOR, J. E. (1903). *Characteristics of electric earth-current disturbances, and their origin*. *Proceedings of the Physical Society*, 71:225.
- TEMMER, M., B. VRŠNAK und A. M. VERONIG (2007). *Periodic Appearance of Coronal Holes and the Related Variation of Solar Wind Parameters*. *Solar Physics*, 241:371–383.
- TORR, M. R., D. G. TORR, R. A. ONG und H. E. HINTEREGGER (1979). *Ionization frequencies for major thermospheric constituents as a function of solar cycle 21*. *Geophysical Research Letters*, 6:771–774.
- TSIDU, G. M. und G. ABRAHA (2014). *Moderate geomagnetic storms of January 22-25, 2012 and their influences on the wave components in ionosphere and MLT*. *Advances in Space Research*.
- TSURUTANI, B. T., W. D. GONZALEZ, A. L. C. GONZALEZ, F. L. GUARNIERI, N. GOPALSWAMY, M. GRANDE, Y. KAMIDE, Y. KASAHARA, G. LU, I. MANN, R. MCPHERRON, F. SORAAS und V. VASYLIUNAS (2006). *Corotating solar wind streams and recurrent geomagnetic activity: A review*. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 111.
- UNGLAUB, C., C. JACOBI, G. SCHMIDTKE, B. NIKUTOWSKI und R. BRUNNER (2011). *EUV-TEC proxy to describe ionospheric variability using satellite-borne solar EUV measurements: First results*. *Advances in Space Research*, 47:1578–1584.

- VIERECK, R. und F. HANSER (2000). *EUVS: An instrument to be flown on the GOES spacecraft*. Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science, 25:379–381.
- VIERECK, R., L. PUGA, D. McMULLIN, D. JUDGE, M. WEBER und W. K. TOBISKA (2001). *The Mg II index: A proxy for solar EUV*. Geophysical Research Letters, 28:1342–1346.
- WINTOFT, P. (2011). *The variability of solar EUV: A multiscale comparison between sunspot number, 10.7 cm flux, LASP MgII index, and SOHO/SEM EUV flux*. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 73:1708–1714.
- WIT, T. D. DE, M. KRETZSCHMAR, J. LILENSTEN und T. WOODS (2009). *Finding the best proxies for the solar UV irradiance*. Geophysical Research Letters, 36.
- WOODS, T. N., F. G. EPARVIER, S. M. BAILEY, P. C. CHAMBERLIN, G. J. R. J. LEAN, S. C. SOLOMON, W. K. TOBISKA und D. L. WOODRASKA (2005). *Solar EUV Experiment (SEE): Mission overview and first results*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 110.
- XU, G. (2007). *GPS: Theory, Algorithms and Applications*. Springer Science & Business Media.

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, die vorliegende Master-Thesis ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Neubrandenburg, 14.10.2014

Erik Schmölter



---

## **Danksagung**

Hiermit möchte ich mich bei allen Personen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit motiviert und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig von der Hochschule Neubrandenburg und Dr. rer. nat. Jens Berdermann sowie Dr. rer. nat. Norbert Jakowski vom DLR Neustrelitz, die durch die vorbildliche Betreuung und fachliche sowie organisatorische Unterstützung wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Neubrandenburg, 14.10.2014