

Elektroneninhalt (TEC) und Weltraumwetter

R. Leitinger⁽¹⁾, N. Jakowski⁽²⁾, G.K. Hartmann⁽³⁾, E. Feichter⁽¹⁾

Zusammenfassung

Der Elektroneninhalt (TEC) ist eine wichtige Größe zur Beschreibung des Ionosphärenzustands. Einige seiner räumlichen und zeitlichen Änderungen haben eine starke Beziehung zum „Weltraumwetter“. Der Elektroneninhalt wird über „Ausbreitungseffekte“ gemessen, die an Radiosignalen auftreten, die von künstlichen Satelliten abgestrahlt und am Boden empfangen werden. TEC-Daten werden in Europa seit 1965 systematisch gesammelt und können seitler zu Langzeituntersuchungen verwendet werden. Die Daten werden u.a. zum Studium geophysikalischer Ereignisse verwendet, wobei besonders die mit dem Weltraumwetter eng zusammenhängenden Magnetstürmeffekte zu erwähnen sind. Sie werden auch dazu verwendet um empirische Modelle zu formulieren, die die großskalige und langzeitige Verhalten gemittelter Elektroneninhalte (Monatsmediane) beschreiben. Wir zeigen Beispiele für ungemittelte Daten, für ein Medianmodell und für TEC-Karten, die regelmäßig für Anwendungszwecke produziert werden.

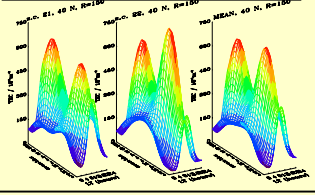
(Ionosphärischer) Elektroneninhalt (TEC)

Die wichtigste Eigenschaft einer Ionosphäre ist das Vorhandensein freier Elektronen. Sie sind für die „Ausbreitungseffekte“ verantwortlich, die wir beobachten, wenn Radiosignale in die Ionosphäre eindringen, oder wenn sie sie durchdringen. Die Anzahl freier Elektronen pro Volumeneinheit ist die wichtigste beschreibende Größe in der Ionosphärenphysik und für zahlreiche Anwendungen der Radiowellenausbreitung. Die längste Datenerfassung haben wir mit der maximalen Elektronendichte N_m , die in Vertikalprofilen zwischen dem Erdboden und dem Interplanetaren Raum auftritt. N_m ist proportional dem Quadrat der „kritischen Frequenz“ der Ionosphäre:

$$N_m = f_o^2 / 80.6, \text{ falls } N_m \text{ in Elektronen pro Kubikmeter und } f_o \text{ in Hz gemessen werden.}$$

Der (vertikale) Elektroneninhalt beschreibt die Gesamtionisation. Es ist dies die Anzahl freier Elektronen in einer Säule von 1 Quadratmeter Querschnitt. Nahezu alle künstlichen Satelliten benutzen Radiowellen zum Nachrichtenaustausch mit Bodenstationen. Ihre Radiosignale müssen die Ionosphäre oder einen Teil der Ionosphäre durchdringen. Sie erleiden „ionosphärische Ausbreitungseffekte“, die in erster Näherung dem „schräg gemessenen Elektroneninhalt“ (Anzahl freier Elektronen in einem Schlauch konstanten Querschnitts um den Signalweg) proportional sind. Durch Projektion kann dann der vertikale Elektroneninhalt (TEC) gewonnen werden.

European TEC model, adopted by COST 251 (right hand display; it is the mean of the models for solar cycle 21 [left] and solar cycle 22 [middle])



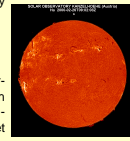
Der Elektroneninhalt hängt ab von geographischer Breite und Länge und von der Zeit. Wie in der Ionosphärenphysik allgemein üblich, muß man unterscheiden zwischen

- hohen Breiten,
- mittleren Breiten und
- niederen Breiten.

Dazu wird die Konfiguration des Erdmagnetfeldes herangezogen: das Zentrum des Gürtels niedriger Breiten ist der „Neigungsgäquator“, während „invariante magnetische Koordinaten“ oder „Dipolkoordinaten“ verwendet werden um die mittleren von den hohen Breiten zu trennen.

Die räumlichen TEC-Skalen reichen von „groß“ (> 1000 km) zu „klein“ (< 1 km). Die großen bis mittleren Skalen geben den „Hintergrund“, der oft dazu gebraucht wird um den Ionosphärenzustand mit Hilfe empirischer Modelle mit Auflösungsvermögen von einigen Grad in Breite und Länge zu charakterisieren. Dem „Hintergrund“ überlagert sind kleinere Strukturen. Eine persistente Struktur ist z.B. der „Haupttrog“ der F-Schicht, den man regelmäßig in Winter- und Äquatorialnächten in geomagnetischen Breiten zwischen etwa 55° und 70° findet. Andere Strukturen sind von transienter Natur oder sind wellenähnlich. Über den Polkapen finden wir „TEC-Patches“, die die Konvektionsbewegung mitmachen. Polwärts des „Trog“ finden wir häufig Erhöhungen des Elektroneninhalts („Blobs“) und nahezu überall treten Wandernde Ionosphärenstörungen (Traveling Ionospheric Disturbances - TIDs) auf, die sich aus wellenähnlichen Anteilen zusammensetzen mit horizontalen Skalen zwischen 10 und mehreren Tausenden von km. Die TIDs werden heute als Signaturen atmosphärischer Schwerwellen interpretiert.

Weltraumwetter

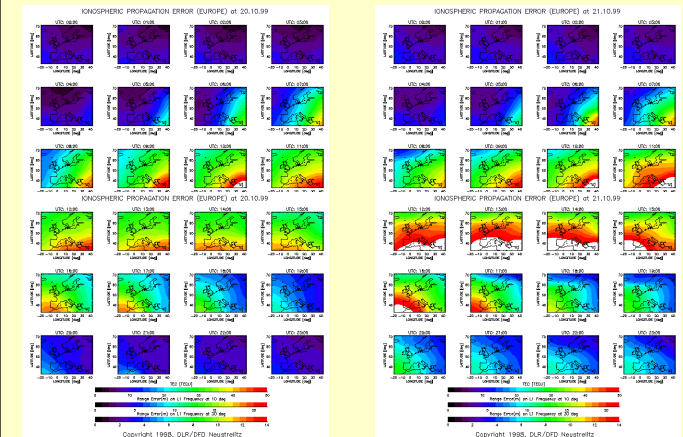


(Hi-Bild der Sonne, aufgenommen am Sonnenobservatorium Kanzelhöhe / IGAM / Universität Graz, 26. Feb. 2000, 09:02:08 UT)

Solar-Terrestrische Beziehungen: über den Sonnenwind über eUV und Röntgenstrahlung

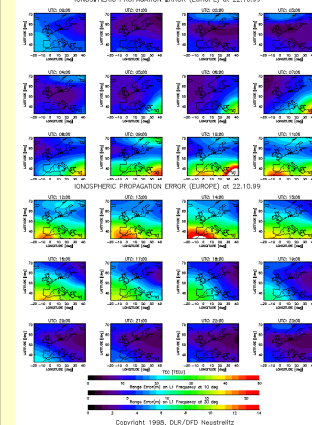
Der **Sonnenwind** beeinflusst unsere Umwelt durch Wechselwirkung mit dem Magnetfeld der Erde. Die Wechselwirkung ist verantwortlich für die Magnetosphäre, die Magnetopause mit ihrer Stoßfront usw. Die extreme **Ultra-Violett-** und die **Röntgenstrahlung** der Sonne sind verantwortlich für das thermische Plasma, in der Ionosphäre und in der Magnetosphäre. **Sonnenwind** und **eUV/Röntgenstrahlung** hängen stark vom Niveau der Sonnenaktivität ab. Die Kurzzeitschwankungen sind für die **Weltraumwetter-Fluktuationen** der Oberen Atmosphäre („Satellitenumgebung“) verantwortlich. Das Magnetfeld und dynamische Prozesse verknüpfen das **Weltraumwetter** mit der mittleren und der unteren Atmosphäre und mit dem Bodenbereich (**Einfluß auf die Biosphäre**). Das spektakulärste **Weltraumwetter-Ereignis** ist der **Große Magnetsturm** mit Pollichtern, Unterbrechung von Radioverbindungen und Beeinträchtigung technischer Einrichtungen.

GPS derived TEC maps illustrating a strong positive storm effect. The GPS satellites are in heights of about 20000 km. A strong geomagnetic storm had its Sudden Commencement in the morning of the 21st October, 1999. The 20th October was geomagnetically quiet. Around local noon and especially in the afternoon of the „storm day“ the electron content is strongly enhanced („positive storm effect“). Such storm effects influence important applications, like satellite navigation, positioning, time transfer. In first order approximation the „propagation errors“ are proportional to slant electron content for the transmitter to receiver radio links.



GPS derived TEC maps, cont. The 22nd October is still affected by the positive storm effect but to a much lesser degree than the 21st October.

(The white areas are regions where the storm TEC exceeded the present scale)



Im Zeitbereich müssen wir klar unterscheiden zwischen

- Kurzzeitvariabilität (Zeitskalen < 1 Stunde),
- Tagesgang (24 Stunden und Harmonische),
- jahreszeitlicher Variation (Monate),
- Abhängigkeit von der Sonnenaktivität („Zyklen“ von etwa 11 Jahren und Unterschiede von Zyklus zu Zyklus)
- langzeitigen „Trends“.

Es ist übliche, zwischen dem „regulären“ Verhalten und überlagerten „Fluktuationen“ zu unterscheiden. Verschiedenste Glättungsverfahren werden angewandt um diese beiden Anteile voneinander zu trennen. Beispiele: die Jahreszeitenabhängigkeit, die Abhängigkeit von der Sonnenaktivität und das Langzeitverhalten werden mit Hilfe von Monatsmediane des Elektroneninhalts untersucht.

Mit Ausnahme „kurzkaliger“ TIDs und „thermosphärischer Modulationen“ stehen die meisten „Fluktuationen“ im Zusammenhang mit dem „Weltraumwetter“ und können als Indikatoren und „Tracer“ dafür verwendet werden.

Die stärksten „geophysikalischen Ereignisse“, die sich im Elektroneninhalt auswirken, sind die Magnetstürmeffekte. Besonders die starken Stürme und ihre ionosphärischen Signaturen sind Teile von Weltraumwetter-Ereignisketten, die in der Sonnenatmosphäre beginnen und in der Biosphäre enden.

Informationen Weltraumwetter / Internet:

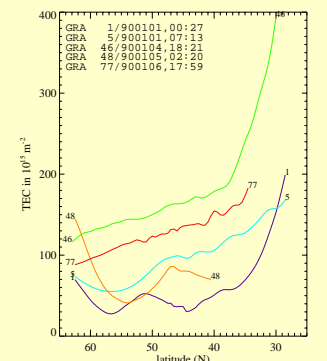
- <http://www.ssi.colorado.edu/SWOP> (Space Weather Center, Colorado)
- <http://sel.noaa.gov/today.html> (Weltraumwetter von heute)
- <http://www.ips.gov.au/asfc/current> (Space Weather Status Panel des Australischen Ionosphären Prediction Service)
- <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/stp.html> (Solar-terrestrische Beziehungen, NOAA)
- <http://www.dxlc.com/solar> (Solar-terrestrischer Aktivitätsbericht)
- <http://www.sec.noaa.gov/ises/data.html> (ISES Index für solare Datenquellen)

Ionosphärische Produkte, Europa / Internet:

- <http://www.roru.rl.ac.uk/iono/> (Vorhersagen usw., Rutherford Appleton Laboratory, England)
- <http://cost251.ictp.trieste.it/> (COST251-Datenbank, Abdus Salam ICTP, Trieste, Italien)
- <ftp://ftp.nz.dlr.de/nav/navigation/TEC/> (ftp Server für TEC-Karten, DLR Neustrelitz)
- <ftp://haydn.cbk.waw.pl/pub/idce/> (ftp Server des Ionosphärischen Dispatch Center für Europa, Warschau, Polen)

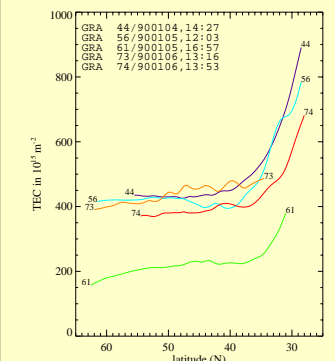
Beispiele für die Breitenabhängigkeit des Elektroneninhalts (TEC) gewonnen über den Diff. Doppler-Effekt und den 150/400 MHz Signalen polar umlaufender Satelliten. Empfangsstation Graz (47°N, 15°E).

Winter-Bedingungen (Januar), hohe Sonnenaktivität. Datum und Zeit (MEZ=UT+1 Stunde) für die Mitten der Kurven sind im Insert angeführt. Ionosphärische „Strukturen“ TEC-Anstieg zur Äquatorialen Anomalie (1, 46); Haupttrog (1, 48). Signaturen großskaliger Wandernder Ionosph. Störungen (LS-TIDs) (besonders 77).



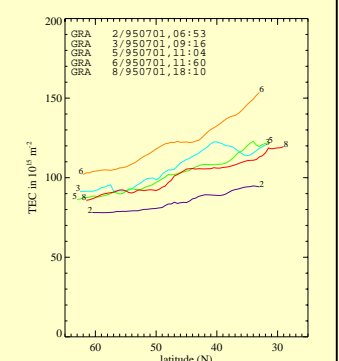
Beispiele für die Breitenabhängigkeit des Elektroneninhalts (TEC) gewonnen über den Diff. Doppler-Effekt und den 150/400 MHz Signalen polar umlaufender Satelliten. Empfangsstation Graz (47°N, 15°E).

Winter-Bedingungen (Januar), hohe Sonnenaktivität. Datum und Zeit (MEZ=UT+1 Stunde) für die Mitten der Kurven sind im Insert angeführt. Ionosphärische „Strukturen“ TEC-Anstieg zur Äquatorialen Anomalie (alle außer 73). Signaturen großskaliger Wandernder Ionosph. Störungen (LS-TIDs) (besonders 56, 73, 74).



Beispiele für die Breitenabhängigkeit des Elektroneninhalts (TEC) gewonnen über den Diff. Doppler-Effekt und den 150/400 MHz Signalen polar umlaufender Satelliten. Empfangsstation Graz (47°N, 15°E).

Sommer-Bedingungen (Juli), niedere Sonnenaktivität. Datum und Zeit (MEZ=UT+1 Stunde) für die Mitten der Kurven sind im Insert angeführt. Typische Tagesprofile für mittlere Breiten. Signaturen großskaliger Wandernder Ionosph. Störungen (LS-TIDs).



Kontakt:

Prof. Dr. Reinhart Leitinger, (TEC and Space Weather)⁽¹⁾
IGAM Universität Graz
Universitätsplatz 5
A-8010 Graz
Internet: kfunigraz.ac.at/igamwww

⁽¹⁾ Institut f. Geophysik, Astrophysik u. Meteorologie
Karl-Franzens-Universität Graz
Universitätsplatz 5, A-8010 Graz

⁽²⁾ DLR/IKN (654) Navigations- und
Leitsysteme
Aussenstelle Neustrelitz
Kalkhorstweg 53, D- 17235 Neustrelitz

⁽³⁾ Max-Planck-Institut für Aeronomie
Max-Planck Str. 2
D-37191 Katlenburg-Lindau