

Einleitung

Die Ionosphäre der Erde ist ein Teil der hohen Atmosphäre, der durch Ionisation gekennzeichnet ist, und in etwa 90 km Höhe beginnt. Unter Ionisation versteht man die Aufspaltung von Gasmolekülen der Luft in Elektronen und Ionen durch die Ultraviolettstrahlung der Sonne (Abb.1). Die häufigsten Gasmoleküle der Luft sind molekularer Stickstoff (N_2) und molekularer Sauerstoff (O_2), oberhalb von 200 km atomarer Sauerstoff (O). Ab 600 km Höhe besteht die Luft im wesentlichen nur noch aus Wasserstoff (H) und Helium (He).

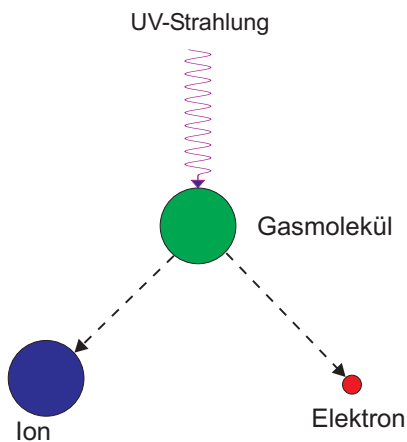


Abb. 1 Ionisation eines neutralen Gasmoleküls durch UV-Strahlung, Elektronen sind negativ, Ionen positiv geladen.

Die Wellenlängen der solaren Ultraviolettstrahlung, die die Ionisation bewirkt, liegen bei etwa 10 bis 100 nm (milliardstel Meter). Auch die solare Röntgenstrahlung mit noch kürzeren Wellenlängen trägt zur Ionisation bei.

Obwohl nur weniger als 1 % der Gasmoleküle ionisiert sind (Abb. 2), erhält die Luft durch die elektrisch geladenen Teilchen (Ionen, Elektronen) eine völlig neue Eigenschaft: sie wird elektrisch leitfähig. Dadurch können in der Ionosphäre Ströme fließen und Radiowellen werden reflektiert, abgelenkt und gestreut. Das Gemisch aus Elektronen, Ionen und Gasmolekülen nennt man Plasma.

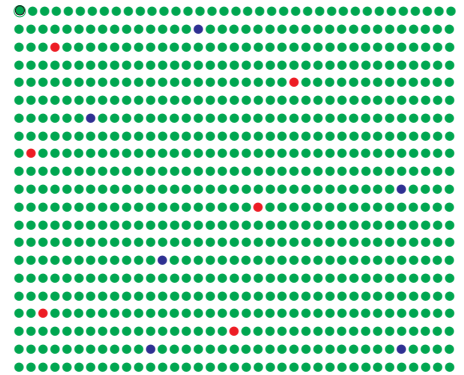


Abb. 2 Schematische Darstellung des Plasmas in der Ionosphäre, bestehend aus wenig Elektronen (rot) und Ionen (blau) und vielen neutralen Gasmolekülen (grün).

Der Name 'Ionosphäre' wurde im Jahre 1926 von dem englischen Physiker Sir Robert Watson-Watt geprägt. Fast 100 Jahre früher, im Jahre 1839 hatte aber der deutsche Mathematiker und Physiker Carl Friedrich Gauß bereits Spekulationen über eine elektrisch leitende Schicht in der hohen Atmosphäre angestellt, um die von ihm beobachteten Variation des Erdmagnetfelds erklären zu können.

Aufbau der Ionosphäre

Die Ionosphäre ist in Schichten verschieden starker Ionisation unterteilt. Als Maß für die Ionisation gilt die Elektronendichte N_e , d.h. die Zahl der Elektronen in einem Würfel von 1 Meter Kantenlänge. Da die Zahl der Elektronen immer gleich der Summe aller Ionen ist, genügt die Angabe der Elektronenzahl. Abb. 3 zeigt einen typischen Verlauf der Elektronendichte mit der Höhe. Die wichtigsten Ionen in der unteren Ionosphäre sind molekularer Sauerstoff (O_2^+) und Stickoxid (NO^+), im Bereich der F-Schicht atomarer Sauerstoff (O^+) und in der oberen Ionosphäre Wasserstoff (H^+) und Helium (He^+). Die Elektronendichte unterliegt starken tages- und jahreszeitlichen Schwankungen. Außerdem wirkt sich die Sonnenaktivität stark auf die Ionisation aus. Die

Sonne weist einen Aktivitätszyklus von 11 Jahren auf, der auch optisch durch die Zahl der Sonnenflecken beobachtbar ist. Im Aktivitätsmaximum (z.B. In den Jahren 1989 und 2000) ist besonders die Röntgenstrahlung von der Sonne erhöht, was eine Zunahme der Ionisation in der Ionosphäre zur Folge hat.

Die Namensgebung der Schichten (Abb. 3) hat historische Gründe. Guglielmo Marconi hatte im Jahre 1901 mit seinen Versuchen zur Radiowellen-Übertragung zwischen Europa und Amerika bewiesen, daß es in etwa 100 km Höhe eine elektrisch leitfähige Schicht geben muß. Der englische Physiker Sir Edward Appleton, der sich besondere Verdienste um die Ionosphärenforschung erwarb, und dafür auch den Nobelpreis erhielt, bezeichnete diese Schicht im Jahre 1927 daher als E(lektrische)-Schicht. Später entdeckte man unter und über dieser E-Schicht noch weitere Schichten, die man dann dem Alphabet entsprechend, D- und F-Schicht nannte.

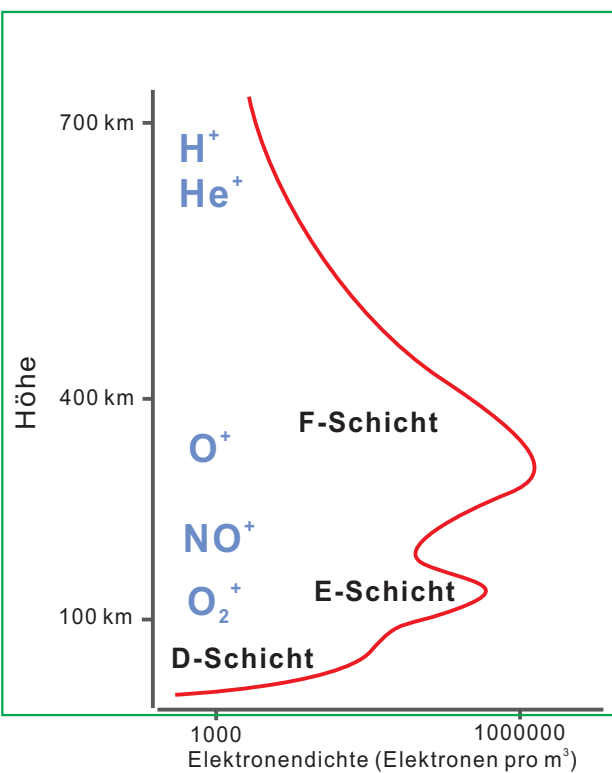


Abb. 3 Elektronendichteverteilung, die wichtigsten Ionen und Ionosphärenschichten

Bei Tage spaltet sich die F-Schicht häufig in zwei Unterschichten auf, die F1- und die F2-Schicht. Letzere ist auch in der Nacht vorhanden, während der alle anderen Schichten verschwinden. Die einzel-

nen Schichten sind nicht nur eine Folge der direkten Ionisation (Abb. 1) sondern auch ihres Umkehrprozesses, der Rekombination. Dabei schließen sich ein Elektronen und eines der verschiedenen Ionen (siehe Abb. 3) wieder zu einem neutralen Gasatom oder Gasmolekül zusammen. Außerdem spielen bei der Schichtbildung (besonders der F2- Schicht) auch Transportprozesse (Diffusion, Winde) eine große Rolle.

Die D-Schicht bildet keine deutlich separierte Schicht, sie erscheint nur als unterer Anhang der E-Schicht (Abb. 3). Sie ist die komplizierteste aller Schichten, zu ihrer vollständigen Beschreibung braucht man mehr als 50 chemische Reaktionen zwischen Ionen, Elektronen und neutralen Gasmolekülen. Außerdem können sich dort durch Anlagerung eines Elektrons an ein Gasmolekül auch negative Ionen bilden.

Im Bereich der D- und E-Schicht spielt auch die Ionisation durch Teilchen aus der Magnetosphäre oder von der Sonne eine Rolle. Der Prozeß verläuft ähnlich wie in Abb. 1 dargestellt, nur daß die Rolle der solaren UV-Strahlung durch ein solches (energiereiches) Teilchen übernommen wird.

Zeitliche und räumliche Variation

Abb. 4 demonstriert die tageszeitliche Variation in der Ionosphäre. Die Elektronendichte ist hier farbkodiert über der Tageszeit und der Höhe aufgetragen. Rote Farbtöne entsprechen einer hohen Elektronendichte, blaue einer niedrigen. Nach Sonnenaufgang (Pfeil SA) steigt die Elektronendichte an, erreicht kurz nach dem lokalen Mittag (der lokale Mittag liegt in Tromsø bei etwa 10:45 Uhr Weltzeit) ihr Maximum und fällt dann zum Sonnenuntergang (SU) hin wieder ab. Die in dieser Abbildung dargestellten Ergebnisse wurden mit der Methode der sogenannten 'inkohärenten Rückstreuung' (EISCAT, s.u.) gewonnen.

Eine räumliche Verteilung der Ionisation über die ganze Erde, wie in Abb. 5 dargestellt, kann man mit einer anderen Radiomethode ermitteln. Man benutzt hierzu Radiowellen, die zwischen einem Satelliten

und einer festen Bodenstation registriert werden. Als Maß für die Ionisation gilt hier der Elektroneninhalt in einer Säule zwischen Satellit und der Bodenstation. Kombiniert man die Daten von mehreren Satelliten und Bodenstationen, kann man die Stärke der Ionisation über einem großen Gebiet darstellen. Auf dem Bild ist sehr gut zu erkennen, daß der Elektronen-inhalt am Mittag und frühen Nachmittag in der Nähe des Äquators am höchsten ist, weil dort die solare Ultraviolettstrahlung am intensivsten ist. Zu den Polen hin und während der Nacht ist der Elektroneninhalt nur gering.

Aktuelle Fragen der Ionosphärenforschung

Während die Bedeutung der Ionosphäre für die Kurzwellenübertragung im Zeitalter der Satellitenkommunikation immer mehr in den Hintergrund tritt, steht heute die Rolle der Ionosphäre in der Wirkungskette der solar-terrestrischen Beziehungen und dem sogenannten 'Weltraumwetter' im Vordergrund. In den folgenden Themenkreisen wird nicht nur am MPAE, sondern auch weltweit geforscht:

Elektronendichte in der Ionosphäre über Tromsø am 22. Januar 1993

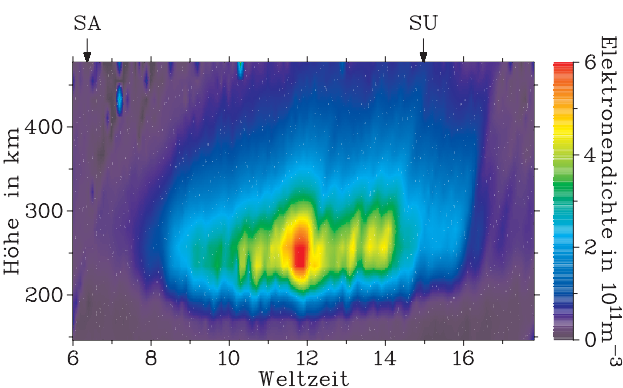


Abb. 4 Beispiel für die tageszeitliche Variation der Elektronendichte in der Ionosphäre

1. Die Energieübertragung von der Sonne auf die Ionosphäre ändert sich im Laufe des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Welche Prozesse sind hier entscheidend?
2. In der Ionosphäre zwischengespeicherte Sonnenenergie wird schließlich auf die neutrale Atmosphäre übertragen. Von Bedeutung sind dabei Winde, atmosphärische Wellen und chemische Reaktionen. Welche Vorgänge laufen dabei im einzelnen ab?
3. Energiereiche Teilchen von der Sonne und aus der Magnetosphäre übertragen ebenfalls Energie in die Ionosphäre,

04/19/95
00:00 - 01:00 UT

Global Ionospheric TEC Map

JPL

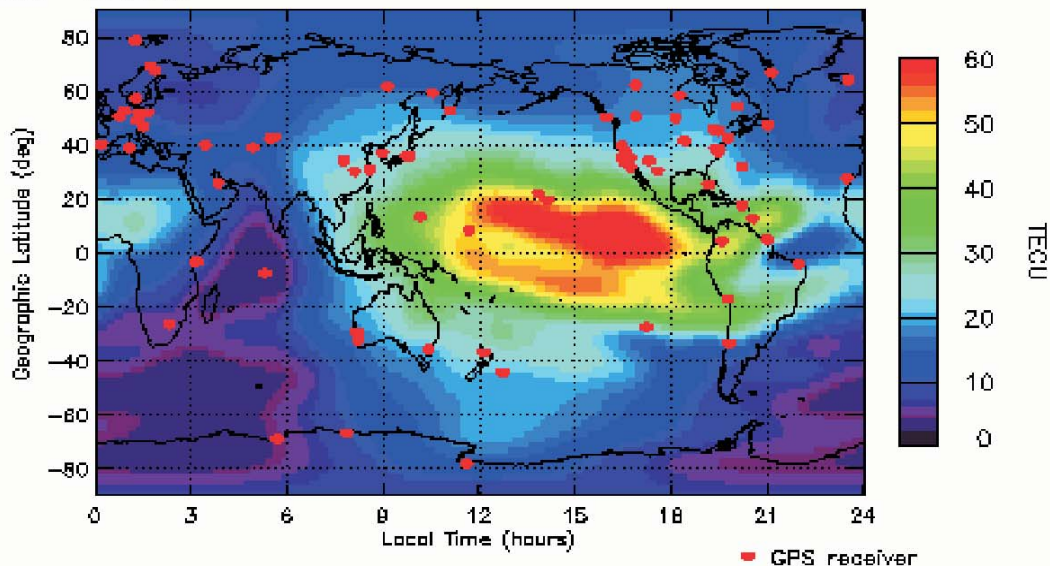


Abb. 5 Beispiel für die globale Verteilung des Elektroneninhalts. (1TECU entspricht 10^{15} Elektronen pro m^2). Als Meßsatelliten dient hier die verschiedenen Untersatelliten des 'Global Positioning Systems' (GPS). Die roten Punkte kennzeichnen die benutzten Bodenstationen.

besonders im Bereich der Pole (Nord- und Südpol). Ein sichtbares Zeichen der Wirkung dieser Teilchen sind die Polarlichter. Wie wird diese Energie global verteilt?

4. Angestrebt wird eine Vorhersage des Weltraumwetters und seine Auswirkungen auf die Erde. Wie reagiert die Ionosphäre auf ganz bestimmte Weltraumwetterlagen? Wie wirken sich diese Bedingungen auf Kommunikation und Navigation aus?

5. Die Ionosphäre bietet die Möglichkeit, sie als riesiges Plasmalabor zu benutzen. Viele Plasmavorgänge lassen sich in normalen Laboranlagen nur schlecht studieren, weil Wandeffekte und begrenzte Abmessungen der Gefäße, in die das Plasma eingeschlossen ist, eine störende Rolle spielen. Diese Einschränkungen liegen in der Ionosphäre nicht vor. Aktive Veränderungen der Ionosphäre können durch Einstrahlung von Radiowellen hoher Leistung ausgelöst werden. Welche Änderungen spielen sich dabei im Plasma ab?

kann. Fragen zu den Themenkreisen 3 und 4 können damit untersucht werden.

DASI ist eine digitale Kamera zum Photographieren von Polarlichtern und zum Studium seiner Form und Dynamik (Themenkreis 4).

COSCAT und SESCAT sind Radargeräte ähnlich wie STARE. Sie dienen hauptsächlich zum Studium von Plasmaprozessen (Themenkreis 5).

Ein Fabry-Perot Interferometer dient zum Studium der Windgeschwindigkeit und der Temperatur der neutralen Atmosphäre. Diese Messungen sind besonders für den Themenkreis 2 wichtig.

Kristian Schlegel

Internet-Seiten:

http://www.kn.nz.dlr.de/WWW_nv_nz/ionos/index.htm
(TEC-Karten, vgl. Abb. 5)

<http://www.sel.noaa.gov/today.html> (Weltraumwetter)

<http://www.eiscat.no/> (EISCAT)

<http://www.meteoros.de/> (Polarlichter u. mehr)

Versuchsanlagen

Zur Durchführung von Forschungsprojekten im Rahmen dieser generellen Fragestellungen stehen dem MPAE eine Reihe von Anlagen zur Verfügung:

EISCAT (European Incoherent Scatter Association) ist eine multinationale Großforschungseinrichtung, die 5 Radarstationen in Nordskandinavien betreibt (Abb. 6). Es sind universelle Geräte zur Ionosphärenforschung und liefern Elektronendichte, Elektronentemperatur, Ionentemperatur und Plasmageschwindigkeit in einem Höhenbereich zwischen 90 km und etwa 2000 km. Studien zu den Themenkreisen 1, 2, 3, 4 und 5 können damit unternommen werden. Zu EISCAT gehört auch die HEATING-Anlage zur Modifikation der Ionosphäre (vgl. Themenkreis 5).

STARE (Scandinavian Twin Auroral Radar Experiment) ist ebenfalls ein Radargerät, mit dem die Plasmageschwindigkeit in der Ionosphäre großräumig erfaßt werden

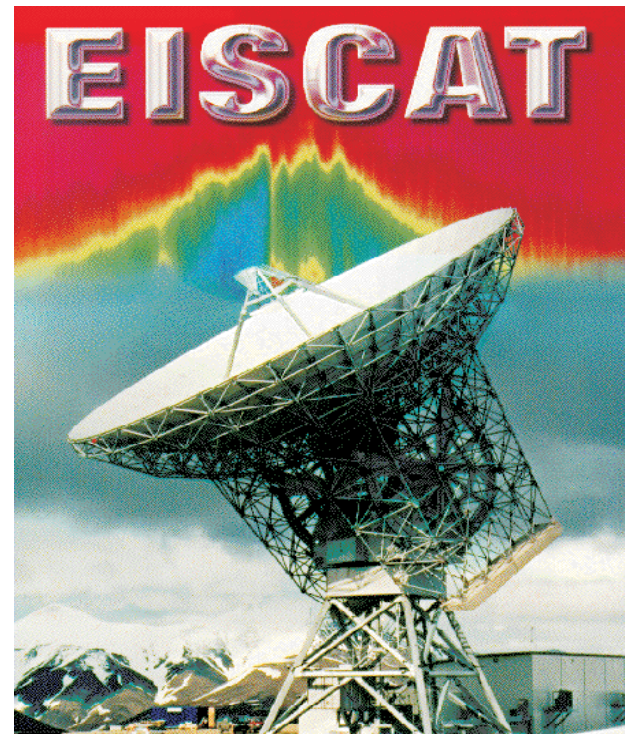


Abb. 6 Antenne des EISCAT-Radars auf der Insel Spitzbergen