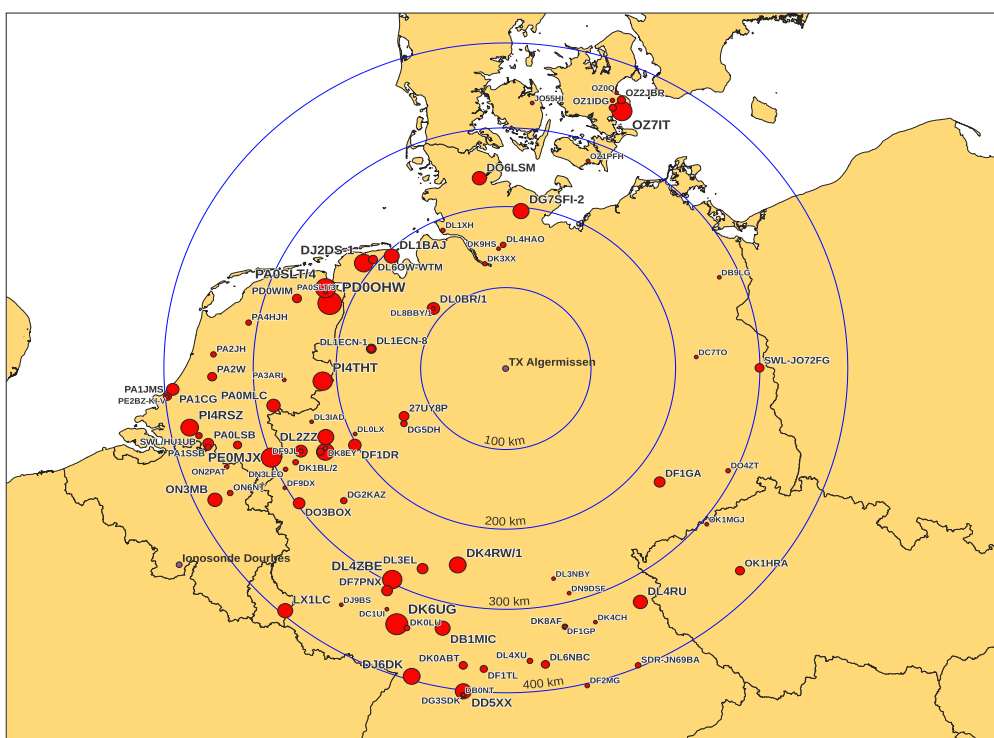


Auf WSPR basierende Analyse

Die Bedeutung der sporadischen E-Schicht im 20-m-Band

Dr. Wolfgang Kaufmann, DL1WKA

In diesem Beitrag soll der Beteiligung der einzelnen ionosphärischen Schichten an der Funkwellenausbreitung im 20-m-Band nachgegangen werden.



WSPR-Kurzstreckenverbindungen im Herbst 2025 im 20-m-Band in der toten Zone der F2-Schicht. Durchmesser und Beschriftungsgröße der Rx-Standorte symbolisieren die Anzahl der im gesamten Messzeitraum eingegangenen Rapporte der jeweiligen Station.
Kartengrundlage: © EuroGeographics 2026 (EuroGeographics Open Data Licence)

Neben der F2-Schicht spielt besonders beim Zustandekommen von Kurzstreckenverbindungen die sporadische E-Schicht offenbar nicht nur im Sommer, sondern auch im Herbst und sogar Winter eine wesentliche Rolle. Basierend auf dem WSPR-Bakenprotokoll von Joe Taylor, K1JT, sollen drei Messkampagnen im 20-m-Band im Sommer, Herbst und Winter hierüber näheren Aufschluss geben.

Grundlegende Überlegungen

Im 20-m-Band hat die Dämpfung von Funkwellen beim Durchgang durch die D-Region keinen wesentlichen Einfluss

mehr. Die Ionisation der E-Schicht (Tagesmaximum $\leq 3,5$ MHz während der Messkampagnen) lässt bei 14 MHz nur noch eine Reflexion bei sehr flach abgestrahlten Funkwellen ($< 15^\circ$) zu. Durch die Wahl einer steiler abstrahlenden Tx-Antenne spielt die E-Schicht für die Funkwellenausbreitung in dieser Untersuchung keine Rolle. Es bleibt nun die F2-Schicht als prominente Reflexionsschicht für Funkdistanzen bis herunter zur toten Zone. Welche Rolle spielt hierbei die sporadische E-Schicht, E_s , bringt man üblicherweise mit der sommerlichen Wellenausbreitung im 10-, 6- und 2-m-

Band in Verbindung. Selbstverständlich reflektiert eine hoch ionisierte E_s -Schicht aber auch in den darunterliegenden Bändern. Die Existenz der sporadischen E-Schicht an sich ist keineswegs sporadisch, sondern ist das ganze Jahr über feststellbar [1]. Unvorhersehbar ist jedoch ihr Ionisationsgrad. Bekannt ist das Ansteigen der kritischen Frequenz, f_oE_s , in den Monaten Mai–August, die dabei starken täglichen und räumlichen Schwankungen unterliegt.

Die Distanz zwischen der Tx-Station und einer Rx-Station legt den Einfallswinkel der Radiowellen auf die E_s - und F2-Schicht fest. Der Einfallswinkel bestimmt die Beugung in der ionosphärischen Schicht. Je steiler der Einfallswinkel ist, desto höher muss der Ionisationsgrad für eine erfolgreiche Reflexion sein. Die aktuelle Elektronendichte in beiden Regionen steuert damit, innerhalb welcher Distanzen ein Funkkontakt zustande kommen kann. Die Tx-Rx-Distanz ist damit ein geeigneter Messparameter für den Zustand der Ionosphäre. Trägt man nun die Distanzen aller Rx-Stationen zum Tx-Standort in Abhängigkeit von der Zeit auf und bildet mit einer geeigneten statistischen Methode hieraus eine Dichtekarte, lässt sich aus dieser auf den zum jeweiligen Zeitpunkt herrschenden Zustand der Ionosphäre schließen [2].

Datenherkunft

Es wurden 2025 drei 14-tägige Messkampagnen (14.–28.7., 22.9.–6.10., 5.12.–19.12) mit einer im 10-minütigen Abstand erfolgenden WSPR-Bakenausstrahlung mit ungefähr 5 W EIRP vom norddeutschen Tx-Standort Algermissen (JO42XG) vorgenommen. Als Antenne wurde eine Diamond BB6WS eingesetzt.

Bisherige Erfahrungen mit dieser Antenne lassen eine näherungsweise horizontale Rundstrahlcharakteristik vermuten, während aufgrund der relativ zur Wellenlänge niedrigen Aufbauhöhe bevorzugt höhere vertikale Erhebungswinkel zu erwarten sind. Die Rx-Rapporte wurden von der Webseite WSPR Live (https://wspr.live/wspr_downloader.php) heruntergeladen. Zur weiteren Analyse wurde der Tagesverlauf der kritischen Frequenzen aller ionosphärischen Schichten mit ihren jeweiligen Höhen über dem Erdboden, soweit erfasst, von den vier Ionosonden in Dourbes, Athen, Roquetes und Pruhonice aus der Lowell DIDBase [3] bezogen (<https://giro.uml.edu/>).

Datenaufbereitung

Es handelt sich dabei um das gleiche Verfahren, wie für das 40-m-Band in [2] vorgestellt. Tag und Uhrzeit der WSPR-Rx-Rapporte wurden für die Erstellung einer Dichtekarte in Dezimalwerte umgerechnet, die Rx-Tx-Distanzen wurden mit dem dekadischen Logarithmus transformiert. Rx-Stationen mit einer Entfernung kleiner 100 km zum Tx-Standort wurden ausgeschlossen, um Verfälschungen durch Bodenwellen-Verbindungen auszuschließen. Rx-Stationen mit einer Distanz größer als 2800 km wurden ebenfalls ausgeschlossen, weil solche Distanzen aufgrund mangelnder flacher Abstrahlwinkel der verwendeten Antenne nur durch einen Mehrfachsprung hätten überwunden werden können. Die erhaltenen Rapporte je ausgestrahlter WSPR-Bake werden über Zeit und Distanz aufgespannt und in eine farbcodierte Dichtedarstellung umgerechnet (Kernel-Density). Die Dichtekarten basieren auf insgesamt 67587 Rapporten im Sommer, 50886 Rapporten im Herbst und 48581 Rapporten im Winter. In die Dichtekarten wurden die geglätteten Verläufe der toten Zone für Reflexionen an der F2- und E_s-Schicht eingetragen. Zur Berechnung wurde die von den Ionosonden gemessene Höhe der F2-Schicht über dem Boden herangezogen, für die von den Ionosonden meist nicht erfasste Höhe der E_s-Schicht wurde fix mit 110 km gerechnet. Um der räumlichen Variation der foE_s wenigstens ansatzweise gerecht zu werden, wurde für die Sommermessung von den vier, etwa quadratisch im Senderaum verteilten Ionosonden jeweils der Maximalwert pro Erfassung für foF2 und foE_s genommen. Für die Herbst- und Wintermessung in-

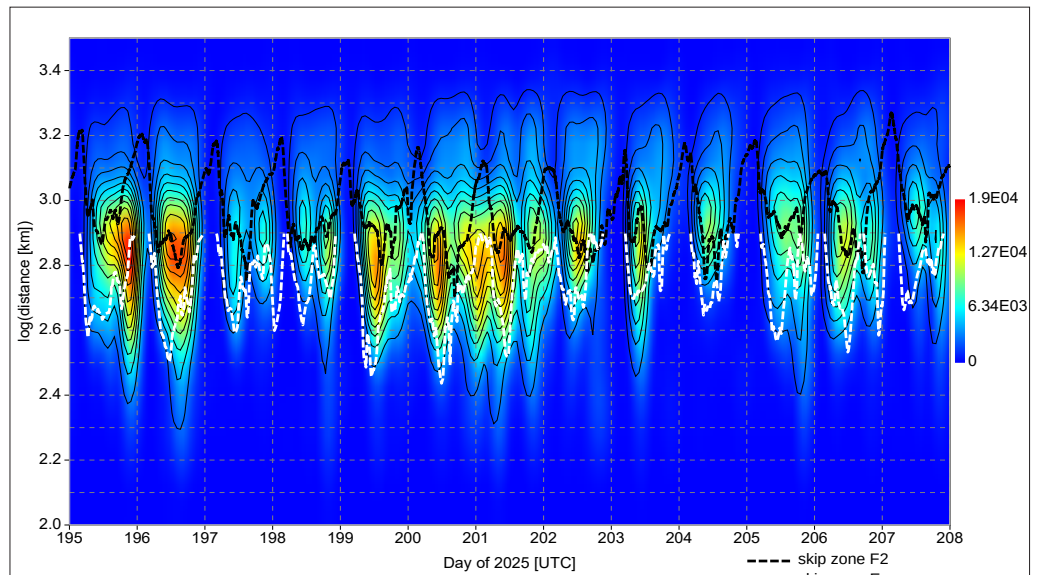


Bild 1: Errechnete Dichtekarte aus der Anzahl je Distanz und Uhrzeit erhaltenen Empfangsrapporte von Rx-Stationen im Radius bis 2800 km um die WSPR-Tx-Station im Sommer 2025. Die Distanzen sind dekadisch logarithmiert dargestellt. Die Tagesverläufe der toten Zone der F2-Schicht (schwarz gestrichelt) und der E_s-Schicht (weiß gestrichelt) sind aus den jeweiligen von vier europäischen Ionosonden gemessenen kritischen Frequenzen berechnet worden

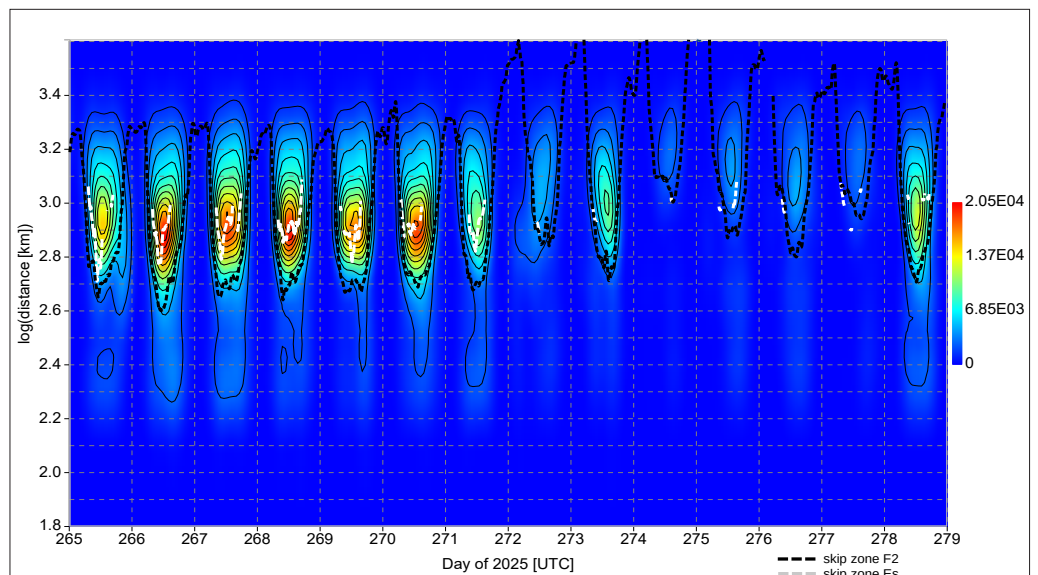


Bild 2: Errechnete Dichtekarte aus der Anzahl je Distanz und Uhrzeit erhaltenen Empfangsrapporte von Rx-Stationen im Radius bis 2800 km um die WSPR-Tx-Station im Herbst 2025. Die Distanzen sind dekadisch logarithmiert dargestellt. Die Tagesverläufe der toten Zone der F2-Schicht (schwarz gestrichelt) und der E_s-Schicht (weiß gestrichelt) sind aus den jeweils von der belgischen Ionosonde in Dourbes gemessenen kritischen Frequenzen berechnet worden

teressierte vor allem der Kurzstreckebereich. Hier wurden nur die Daten der belgischen Ionosonde in Dourbes herangezogen.

Ergebnisse

Betrachten wir zuerst die Dichtekarte der Sommermessung (**Bild 1**). Wie sofort auffällt, liegt die tote Zone der F2-Schicht (schwarz gestrichelt) tagsüber um die 700 km und ist allein nicht in der Lage, die Dichteverteilung der Rap-

porte zu erklären. Erst wenn man den Verlauf der toten Zone der E_s-Schicht (weiß gestrichelt) mit hinzunimmt, ergibt sich ein deutlich stimmigeres Bild. Dabei wurde der Verlauf nur bis zu einer Distanz eingezeichnet, für die der Antennenabstrahlwinkel noch größer 15° ist. Längere Distanzen werden mit dem verwendeten Antennenaufbau nicht mehr im Einzelsprung an der E_s-Schicht erreicht, sondern sind dann ausschließlich der Reflexion an der F2-Schicht zuzu-

schreiben. Aufgrund der räumlich variablen Ionisationsdichte der E_s-Schicht ist selbst durch Hinzuziehen der Daten von vier im Empfangsraum verteilten Ionosonden keine vollständige Übereinstimmung zwischen den punktuell erfolgten Ionosonden-Messungen und der flächendeckenden WSPR-Messung zu erwarten. Auffällig ist in Bild 1 eine starke Abweichung gegen 23 Uhr am Tag 200. Hier liegt ein lokales Rapport-Dichtemaximum vor, für das die Ionosonden-Messungen keine Erklärung liefern. Eine genauere Betrachtung der Rapporte lässt keine räumliche Konzentration der Empfangsstationen erkennen, die auf eine von den Ionosonden nicht erfasste lokale stark ionisierte E_s-„Wolke“ hinweisen würde.

Bild 2 stellt die Dichtekarte der Herbstmessung dar. Hier fällt sofort die hohe Übereinstimmung des Verlaufs der toten Zone der F2-Schicht (schwarz gestrichelt) mit der Dichteverteilung der Rapporte auf. Im Gegensatz zum Sommer mit seinem durchschnittlich deutlich niedrigeren Ionisationsgrad der F2-Schicht dominiert die Reflexion an der F2-Schicht nun die tägliche Funkausbreitung bis zu Tx-Rx-Distanzen auf 400 km herab. Die tote Zone der E_s-Schicht (weiß gestrichelt) ist jetzt laut Ionosonden-Messungen deutlich länger als die der F2-Schicht. Trotzdem finden, wenn auch in deutlich geringerer Dichte, WSPR-Kontakte bis hinab auf

100 km Sprungdistanz an den ionosphärisch ungestörten Tagen 265–271 und dann wieder 278 statt. Wie kann das sein?

Im **Aufmacherbild** sind die Empfangsorte der Kurzstreckenverbindungen im Radius von 100–400 km dargestellt. Die Größe des Standortsymbols codiert die Anzahl der im gesamten Messzeitraum eingegangenen Rapporte der jeweiligen Station. Es ist kein räumliches Muster erkennbar, dass Aufschluss über das Zustandekommen dieser Kurzstreckenverbindungen geben könnte. Als Nächstes ist in **Bild 3** der Tagesverlauf der stündlichen Anzahl Rapporte dieser Kurzstreckenkontakte, jeweils aufsummiert über den zweiwöchigen Messzeitraum, dargestellt. Das ist nun sehr aufschlussreich, denn er lässt sich mit der Addition dreier Sinusschwingungen mit einem Bestimmtheitsmaß von 98,2 % nachbilden (rote Linie in Bild 3). Diese Sinusschwingungen haben die Periodendauern 23 h, 11,5 h und 7,7 h. Diese entsprechen nun ziemlich genau den atmosphärischen Gezeiten und ihren Subharmonischen in der Bildungszone der sporadischen E-Schicht (Diurnal Tide, Semidiurnal Tide, Terdiurnal Tide mit Periodenlängen von 24 h, 12 h und 8 h) [4]. Damit liegt der Schluss nahe, dass die Kurzstreckenverbindungen auf Reflexionen an der sporadischen E-Schicht zurückzuführen sind, auch wenn die Ionosonden-Messungen etwas anderes sagen.

Die hier nicht weiter dargestellten Wintermessungen ergeben ein vergleichbares Bild, nur das aufgrund der weiter verkürzten Tageslänge auch die täglichen Empfangszeitspannen kleiner geworden sind. Auch hier finden noch Kurzstreckenverbindungen, wenn auch in geringem Umfang statt, für die es keine Entsprechung bei den Ionosonden-Messungen gibt.

Schlussbetrachtung

Während die von den Ionosonden an der F2-Schicht vorgenommenen Messungen in sehr guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der WSPR-Messkampagnen stehen, scheint die Erfassung der Ionisationsdichte der sporadischen E-Schicht durch Ionosonden nicht immer zuverlässig. Die sporadische E-Schicht ermöglicht offenbar grundsätzlich während des ganzen Jahres, insbesondere aber in den Sommermonaten, tagsüber Kurzstreckenverbindungen im 20-m-Band.

Danksagung

Der Autor dankt den Betreibern von WSPRnet und allen WSPR-Empfangsstationen. Ionosphärische Daten wurden zur Verfügung gestellt vom „Ionospheric Observatory in Dourbes, owned and operated by the Royal Meteorological Institute (RMI) of Belgium“, vom „Pruhonice Observatory of the Institute of Atmospheric Physics CAS, Czech Republic“, vom „Observatory of Ebre, Spain“ und vom „National Observatory of Athens, Greece“.

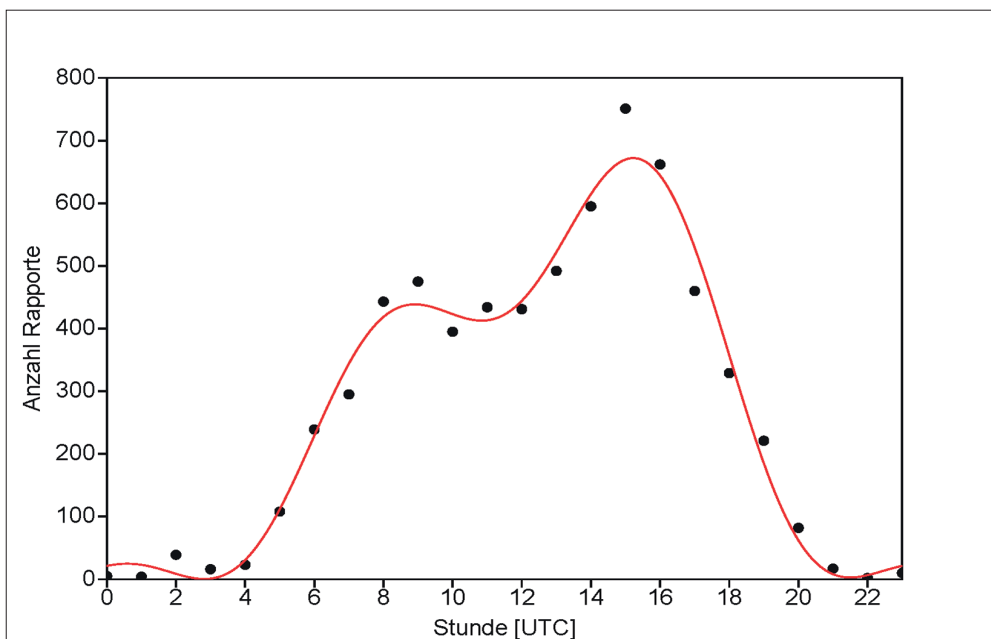


Bild 3: Durchschnittlicher Tagesverlauf der Anzahl stündlich empfangener Rapporte von Rx-Stationen, die im Umkreis von 100–400 km um die Tx-Station lagen. Die rote Linie ist die Summe der Momentanwerte dreier Sinusschwingungen, die mit einem Bestimmtheitsmaß von 98,2 % den gemessenen Daten angenähert ist (sinusoidale Regression)

Links & Literatur

- [1] Kaufmann W. (2022). „The role of meteoric influx and the geomagnetic disturbance on the seasonal forming of sporadic E over Europe“. WGN, Journal of the IMO, 50:2, 62–65
- [2] Kaufmann W. (2025). „Ionosphären-Beobachtung mit WSPR im 40 m Band“. CQ DL 9/25, 48–50
- [3] Reinisch B. W. and I. A. Galkin (2011). „Global ionospheric radio observatory (GIRO)“. Earth, Planets, and Space, 63, 377–381, doi:10.5047/eps.2011.03.001, 2011
- [4] Kaufmann W. (2021). „Study of Sporadic E Occurrence in Europe 2021“. WGN, Journal of the IMO, 49:5, 114–119