

Prognosekarten für troposphärische Überreichweiten

Dr. rer. nat. MATTHIAS HORNSTEINER – DG4MHM

Troposphärische Überreichweiten lassen sich effizienter ausnutzen, wenn man sich im Vorfeld darauf einstellen kann. Eine neue und frei zugängliche Informationsquelle für Tropo-DX-Prognosen kommt aus Frankreich. Der folgende Beitrag stellt diese Vorhersagekarten vor und vergleicht sie mit den bekannten Hepburn-Prognosekarten.

Für Funkamateure und BC-DXer, die auf den UHF/VHF-Bändern unterwegs sind, sind der Herbst und Winter ganz besondere Jahreszeiten. Wenn die Niederungen im Nebel versinken und auf den Bergen strahlender Sonnenschein bei milden Temperaturen herrscht, stehen die Chancen gut, in den Genuss troposphärischer Überreich-

mittlerweile können sie aber als recht zuverlässig gelten. Leider weiß niemand genau, wie Hepburn diese Karten generiert. Dazu hält er sich stets bedeckt.

Es ist lehrreich, die Resultate verschiedener numerischer Wettervorhersagemodelle zu vergleichen. Gleiches gilt für DX-Prognosemodelle, nur waren *The Hepburn*

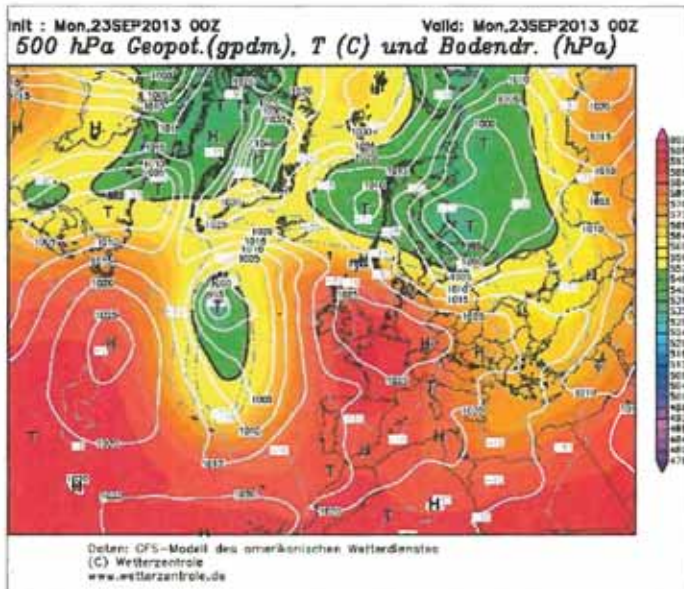


Bild 1:
Analyse des GFS-Modells zur Boden-druckverteilung am 23. 9. 13, 0000 UTC

Screenshots:
DG4MHM

weiten zu kommen. Deren Vorteil im Vergleich zum Iono-DX liegt u. a. darin, dass man sie aufgrund ihrer Wetterlagenabhängigkeit prognostizieren kann.

Seit Langem existieren im Internet Wettervorhersagekarten mit anschaulicher Visualisierung. Hier ist vor allem [1] zu empfehlen; sehr informativ ist auch [2], wo man sich ohne meteorologische Vorkenntnisse aber weniger leicht zurechtfindet.

Leider erlauben gewöhnliche Wetterprognosekarten keine Rückschlüsse auf mögliche Tropo-DX-Bedingungen. Zwar sind diese in der Regel an Hochdrucklagen geknüpft, doch ist Hochdruckgebiet nicht gleich Hochdruckgebiet. Bisweilen enttäuschen sie – aus verschiedenen Gründen – die hochgesteckten Erwartungen.

Abhilfe schaffen die seit Mai 2000 im Internet abrufbaren Tropo-Prognosekarten des Kanadiers William Hepburn [3]. In den Anfangsjahren waren die Vorhersagen zwar mit großer Vorsicht zu genießen,

Charts mehr als ein Jahrzehnt lang konkurrenzlos. Das hat sich im Sommer 2012 geändert. Seitdem bietet Pascal Grandjean, F5LEN, ebenfalls ein solches Produkt an [4], welches wir uns im übernächsten Abschnitt näher anschauen. Zunächst beleuchten wir die wichtigsten radiometeorologischen Aspekte der troposphärischen Wellenausbreitung.

■ Radiowellenausbreitung in der Troposphäre

Radiowellen breiten sich geradlinig aus, wenn ihre Phasengeschwindigkeit v mit der Vakuumlichtgeschwindigkeit c übereinstimmt. Das Verhältnis zwischen beiden Größen ist der Brechungsindex

$$n = \frac{c}{v} \quad (1)$$

Da die Phasengeschwindigkeit v keine Wellenenergie transportiert, könnte sie die Lichtgeschwindigkeit übertreffen, ohne mit der Einsteinschen Relativitätstheorie

zu kollidieren. In der Tat gibt es Medien, für die $n < 1$ oder sogar $n < 0$ gilt. Mit solchen Sonderfällen wollen wir uns hier nicht beschäftigen, sondern wir verbleiben in der Troposphäre. Die dort stets wechselnden Druck-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse führen zu unterschiedlichen Phasengeschwindigkeiten und schwankenden Brechungsindizes. Damit verbunden ist eine Abweichung von der geradlinigen Ausbreitung.

Da der Brechungsindex n für Radiowellen in der Atmosphäre nahe an 1 liegt (in Meeresspiegelhöhe beträgt der Wert 1,0003), führt man zur Vereinfachung die *Refraktivität* N ein:

$$N = (n - 1) \cdot 10^6 \quad (2)$$

Für die Bestimmung von N gibt es semiempirische Gleichungen. [5] verwendet

$$N = N_{\text{dry}} + N_{\text{wet}} = 77,6 \frac{p}{T} + 4810 \frac{e}{T^2} \quad (3)$$

Hier bedeuten T die Temperatur, p den Luftdruck und e den Partialdruck des Wasserdampfes (kurz *Dampfdruck* genannt). N_{dry} und N_{wet} sind der Trocken- bzw. Feuchte-term, hierzu weiter hinten mehr.

Wichtig für Überreichweiten ist jedoch weniger der absolute N -Wert, sondern seine Änderung dN/dz mit der Höhe z (auch *Höhengradient* genannt). In den unteren Schichten der sog. *Standardatmosphäre* haben wir $dN/dz = -3,9/100$ m. Von wenigen Ausnahmen abgesehen nimmt also die Refraktivität mit der Höhe ab (der Gradient ist negativ) und daraus resultiert eine leicht gekrümmte Wellenbahn.

Das ist der Grund, warum der radiooptische Horizont hinter dem geometrischen Horizont liegt. Je nach Frequenzbereich kann der Unterschied 15 % bis 20 % ausmachen.

Interessant wird es, wenn die Welle beginnt, sich stärker zu krümmen als der Erdradius. Sie entfernt sich dann nicht mehr immer weiter weg von der Erde, sondern erfährt eine Brechung zurück in Richtung Erdoberfläche. Dieses Phänomen heißt *Ducting* (engl.) oder *Wellenleitung* und stellt sich bei N -Gradienten von (betragsmäßig) größer als $-15,7/100$ m ein. Je ausgeprägter der Gradient ist, umso intensiver sind die Überreichweiten. Ziel einer Tropo-DX-Vorhersage muss es daher sein, die N -Gradienten zu prognostizieren.

■ Tropo-DX-Prognosemodell nach F5LEN

Für die Bestimmung der N -Gradienten sind also Informationen über Druck, Temperatur und Feuchte in einer bestimmten Höhe erforderlich. Diese (Vorhersage-)Daten lassen sich numerischen Wetterprognosemodellen entnehmen. Der Output des

amerikanischen Modells *GFS* ist frei im Internet verfügbar [6] und dient als Basis für die Generierung der DX-Karten von F5LEN.

Derzeit verfügt das GFS-Modell über eine horizontale Auflösung von $0,3^\circ$ und 64 vertikale Modellflächen auf geländefolgenden Koordinaten (sog. *Sigma-Koordinaten*). Für unsere Belange genügen die untersten Flächen, denn Tropo-Überreichweiten spielen sich fast immer in Höhenlagen unterhalb 1500 m ab.

Für jeden Gitterpunkt rechnet das Modell u. a. Werte für Temperatur und Feuchte. Mit den Höhen der Druckflächen lässt sich daraus der Gradient dN/dz bestimmen, wobei F5LEN gemäß Gleichung (3) die Refraktivität auf vier Druckflächen zwischen 975 hPa und 850 hPa berechnet. Das 850-hPa-Niveau befindet sich üblicherweise in 1450 m bis 1550 m Höhe; während einer Kältewelle im Winter kann es unter 1400 m liegen und bei kräftigen sommerlichen Hochdrucklagen bisweilen über 1600 m.

Schön anzusehen bei [4] ist die Animation der insgesamt 31 Prognosekarten, wobei man die automatisch ablaufende Bildersequenz mit einem Mausklick auf eine der Abbildungen stoppen kann. Sie sind mit der Software GrADS [7] erstellt und haben eine größere zeitliche Auflösung als bei [3]. Die ersten 18 Karten liegen im Drei-Stunden-Intervall vor (somit bis zum Prognosezeitraum 60 h), danach vergrößert sich der Abstand auf 6 h. Die Vorhersagen reichen bis 192 h (acht Tage) in die Zukunft. Zumindest im Herbst, wenn sich stabile Hochdruckwetterlagen einstellen, sind sinnvolle Prognosen über so lange Zeiträume durchaus möglich. Dagegen bietet [3] während der ersten 48 h lediglich eine 6-Stunden-Auflösung und darüber hinaus (bis 138 h) eine Auflösung von 24 h an. Zusammen ergibt dies also nur zwölf Karten.

Man beachte, dass die F5LEN-Karten lediglich für Europa und für die Region zwischen der Iberischen Halbinsel und den Kanarischen Inseln verfügbar sind. Dagegen deckt [3] praktisch die ganze Welt und

somit auch die Tropen ab. Daher bedarf es hier einer erweiterten Skaleneinteilung bzgl. der DX-Intensität, denn über (sub-)tropischen Meeresflächen können sich extrem starke *Ducts* ausbilden, die in Mitteleuropa undenkbar sind.

Für unsere gemäßigten Breiten ist die siebenstufige Intensitätsskala bei [4] allemal ausreichend. In der Amateurfunkpraxis dürfte man den Unterschied zwischen Stufe 6 und 7 ohnehin kaum bemerken, sodass eine feinere Einteilung lediglich von wissenschaftlichem Interesse ist.

Für einen Vergleich der DX-Prognosemodelle ziehen wir die ungewöhnlich stark ausgeprägte Bandöffnung vom 23.9.13 heran. Der Zeitraum 22. bis 25.9.13 markierte nicht nur den Start in die herbstliche Tropo-Saison, sondern wartete über Mitteleuropa mit einer DX-Intensität auf, die teilweise sogar die Rekord-Ausbreitungsbedingungen vom Oktober/November 2012 in den Schatten stellten.

Die mit Abstand besten Überreichweiten boten dabei der 23. und 24.9.13, allerdings

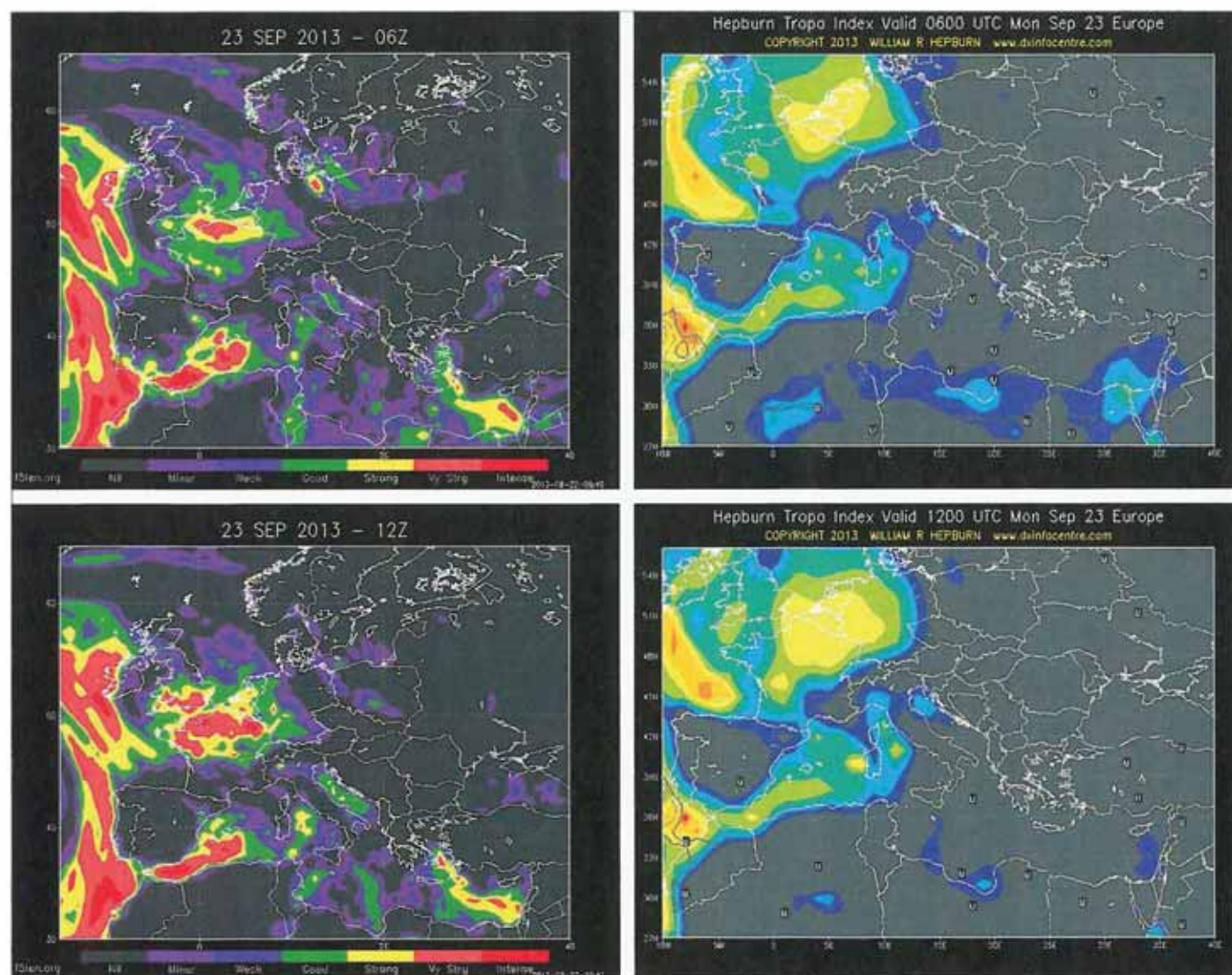


Bild 2: Vergleich der DX-Prognosen von F5LEN (linke Spalte) und William Hepburn (rechte Spalte) am 23.9.13 um 0000 UTC (oben) sowie um 1200 UTC (unten)

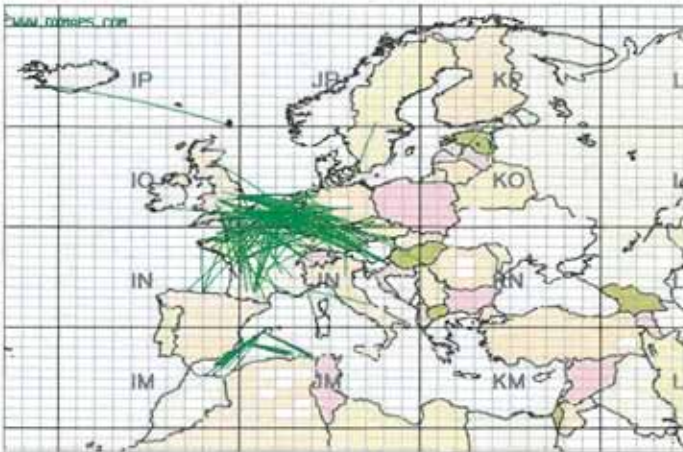


Bild 3:
2-m-Amateurfunk-
verbindungen
über Mitteleuropa
am 23. 9. 13

zeigte währenddessen die Wetterlage nicht das klassische Hochdrucklagenmuster. Zwischen zwei umfangreichen Tiefdruckgebieten mit Zentren westlich von Irland und östlich des Baltikums stellte sich über Mitteleuropa eine gradientenschwache Druckverteilung ein, wobei Warmluft insbesondere in Richtung Frankreich und Britische Inseln strömte (Bild 1).

In dieser Zone bildete sich eine schwach ausgeprägte Hochdruckzelle mit Kern über dem Ärmelkanal aus. Diese eher unspektakulär erscheinende Wetterlage bescherte allerdings extrem scharfe Inversionsgrenzflächen.

Hinzu kam, dass sich die Inversion in relativ großer Höhe (1400 bis 1500 m ü. NN) befand, was nicht nur auf 2 m und 70 cm etliche Funkkontakte über mehr als 1000 km bescherte. Auch im UKW-Rundfunkband waren im südlichen Oberbayern und sogar in Oberösterreich zahlreiche Sender aus England, Frankreich, Belgien und den Niederlanden empfangbar, und das stabil über viele Stunden hinweg mit hohen Feldstärken. Die maximalen Distanzen betrugen 1243 km (Oberbayern) bzw. 1360 km (Oberösterreich).

Interessanterweise ging es auf den Amateurfunkbändern nicht wesentlich weiter (von wenigen Ausnahmen abgesehen); die meisten Verbindungen gelangen zwischen Deutschland/Österreich auf der einen Seite und Frankreich/England am anderen Ende des Wellenleiters, vgl. a. [9].

Der Duct war so stark, dass selbst im 6-m-Band einige Funkverbindungen mit Distanzen über 500 km zustande kamen. Bekanntlich ist das Magic Band in Bezug auf Tropo-Überreichweiten alles andere als „magisch“, denn die üblichen vertikalen Duct-Ausdehnungen sind für Frequenzen um 50 MHz zu gering. Das bedeutet nicht, dass Signale im 6-m-Band nicht im Duct weitergeleitet werden können; dieser verhält sich für die Wellenenergie aber zunehmend „durchlässig“, sodass die Reichweiten rapide abnehmen. Beim Vergleich beider Modelle sticht zunächst die größere „Unruhe“ der Farbver-

teilung in den F5LEN-Karten ins Auge (Bild 2). Auf den Hepburn-Karten wirken die DX-Zonen zusammenhängender, sodass man den Eindruck gewinnt, als wäre hier eine Glättung der Daten erfolgt.

Ohne eine abschließende Bewertung vornehmen zu wollen, muss man konstatieren, dass die in [4] gezeigten kleinskaligen Strukturen nicht unrealistisch sind.

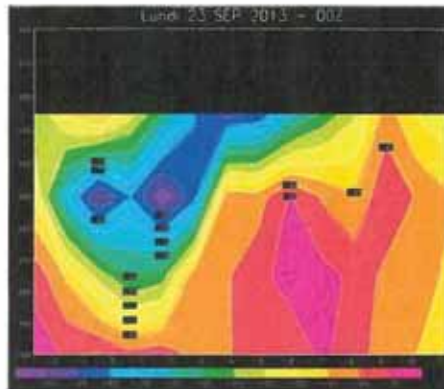


Bild 4: Der Querschnitt entlang einer Verbindungslinie Mittenwald/Oberbayern-Bristol/Südengland zeigt die vom GFS-Modell prognostizierten vertikalen Refraktivitätsgradienten für den 23. 9. 13.

Schließlich erlebten in Deutschland die Funkamateure und BC-DXer die September-Überreichweiten in höchst unterschiedlicher Intensität. Einige schwärmten von einer regelrechten „Jahrhundert-Band-Öffnung“ (so in Teilen Oberbayerns, Sachsens und Schleswig-Holsteins), während andere allenfalls von leicht angehobenen Bedingungen berichten konnten (wie in Hessen). Mecklenburg-Vorpommern blieb offensichtlich ganz von den Überreichweiten unberührt, wie ortsansässige DXer klagten. Die eingetragenen QSO-Verbindungen in [8] bestätigen diese „Ungerechtigkeit“ (Bild 3).

Für den 23. 9. 13 ist ein signifikanter Unterschied zwischen [3] und [4] erkennbar: Während die F5LEN-Karten den Nordosten Deutschlands tatsächlich aussparen, prognostizierten Hepburns Abbildungen auch dort passable Ausbreitungsbedingun-

gen, wenngleich nicht ganz so intensiv wie über den westlichen und südlichen Landesteilen. [4] gab somit die DX-Verhältnisse realistischer wieder.

Letztlich ist dies aber nur ein Fallbeispiel. Welches der beiden Modelle im Mittel näher an den realen DX-Bedingungen liegt, müssen künftige Tests untersuchen und entscheiden.

Man kann sich die dn/dz -Werte auch im Querschnitt anschauen. Bild 4 zeigt komplexe und teilweise sogar röhrenartige Muster mit besonders hohen N-Gradienten im Zentrum. Die Frage ist, welche atmosphärischen Prozesse zu diesen Strukturen führen. Der Querschnitt in Bild 4 verläuft entlang einer Linie Bristol/Südengland – Mittenwald/Oberbayern und damit genau durch das Zentrum der Hochdruckzone (Bild 1), wo kaum Druckgegensätze vorhanden waren. Die Interpretation dieser neuen Art von Wetterkarten ist sicherlich nicht trivial und Gegenstand künftiger Forschung.

■ Modifikations- und Verbesserungsmöglichkeiten

Obwohl [4] die realen Ausbreitungsverhältnisse hervorragend approximiert und mit dem etablierten Hepburn-Modell auf alle Fälle mithalten (oder dieses sogar übertreffen) kann, sind Modifikationen und Erweiterungen denkbar.

Theorie

Gleichung (3) ist zwar in der Fachliteratur weitverbreitet, jedoch fiel mir eine Inkonsistenz auf. Zur Verbesserung habe ich Vorüberlegungen angestellt, die Interessenten in nebenstehendem Kasten nachlesen können. Darauf aufbauend lässt sich die Gleichung für die Refraktivität erweitern:

$$\begin{aligned}
 N(z) = & 77,6890 \frac{p_d(z)}{T(z)} Z_d^{-1} \\
 & + 71,2952 \frac{e(z)}{T(z)} Z_w^{-1} \\
 & + 3,75463 \cdot 10^5 \frac{e(z)}{T^2} Z_w^{-1} \\
 & + 1,4 W_w \\
 & + 0,6 W_i
 \end{aligned} \tag{7}$$

Die fünf Zeilen der Gleichung bedeuten im Einzelnen von oben nach unten:

- Trockenterm (N_{dry})
- Feuchterm (N_{wet} , 2. und 3. Zeile)
- Streuterm, W_w ist die Konzentration von Flüssigwasser in $g \cdot cm^{-3}$
- Streuterm, W_i ist die Konzentration von Eiswasser in $g \cdot cm^{-3}$

Z_d^{-1} und Z_w^{-1} sind die inversen Kompressibilitätsfaktoren für trockene Luft und für

Wasserdampf. Sie geben die Abweichungen vom idealen Gas an und werden auf empirischem Wege bestimmt.

Der Koeffizient 77,6890 ist gültig für eine CO_2 -Konzentration von 375 ppm. Hingegen stammt der Wert 77,6 aus älterer Literatur.

Es ist klar, dass die Berücksichtigung dieser Modifikationen zu keinen dramatischen Abweichungen von den mit Gleichung (3) erhaltenen Resultaten führt. Schaden kann es allerdings nicht, die Korrekturterme mitzuführen, schließlich arbeitet Gleichung (7) im Modell sowieso ein Computer ab. Die Terme 3 und 4 in dieser Formel darf man ruhigen Gewissens vernachlässigen (sie sind ohnehin nicht aus Routinedatenquellen wie Radiosonden verfügbar). Unter erdatmosphäri-

schen Bedingungen sind die Z-Koeffizienten ebenfalls wenig bedeutsam.

Modellarchitektur

Bei DX-Prognosen ist es wichtig, den Einfluss der Topographie zu berücksichtigen, der in Bild 4 nicht zum Tragen kommt. Wünschenswert ist zudem eine höhere vertikale Auflösung, denn die F5LEN-Karten basieren bislang auf dem GFS-Modell-Output. Dieser bietet in der Vertikalen lediglich Druckflächen im Abstand von mindestens 25 hPa an, außerdem fehlt die Topographie und die horizontale Auflösung ist mit $0,5^\circ$ auch etwas gröber als im Original (Letzteres wäre aber zu verschmerzen). Leider habe ich noch keine Möglichkeit gefunden, an die Modelldaten selbst heranzukommen. Bei diesen

hätte man eine vertikale Auflösung in der Größenordnung von 3 hPa, was ungefähr 25 m entspricht.

Ein Ansatz ist, digitale Terraindaten in GrADS einzubauen, um wenigstens eine Orientierungshilfe zu haben (das GFS-Modell kann ja nicht mehr auf die nachträglich implementierte Topographie reagieren). Zu den vom GFS-Output gelieferten Druckflächen könnte man weitere Levels integrieren und zwischen diesen interpolieren, um N-Gradienten über kleinere Höhenintervalle zu erhalten. Allerdings sind bei starken Absinkinversionen die Übergangszonen so scharf, dass sie bislang kein numerisches Modell voll erfassen kann.

Nachdem Ducts in unterschiedlichen Höhen auftreten, wäre die Erstellung von DX-Prognosekarten für unterschiedliche Höhenlagen erstrebenswert, beispielsweise von 1000 hPa bis 950 hPa, 950 hPa bis 900 hPa und 900 hPa bis 850 hPa. Den Betrag des stärksten N-Gradienten in der jeweiligen Schicht könnte man dann für die Beurteilung der zu erwartenden DX-Aktivität heranziehen.

Zu guter Letzt wäre es interessant, die verschiedenen Arten von Wellenleitern (*elevated duct*, *ground duct*) im Modell zu berücksichtigen. Hierzu ist die Bestimmung des sogenannten *modifizierten Brechungsindex* hilfreich, auf den ich an dieser Stelle nicht eingehen will. Kenntnisse über die Wellenleiterart können Aufschluss darüber geben, ob bei starken dN/dz -Gradienten tatsächlich gute Condx zu erwarten sind. Bei abgehobenen Wellenleitern (*elevated ducts*) kann man nämlich in eine empfangstote Zone gelangen, wenn man sich auf zu geringer Höhe befindet.

Obwohl das Prognosemodell bereits jetzt gut arbeitet, gibt es, wie wir gesehen haben, noch viele Verbesserungs- und Erweiterungsmöglichkeiten. Sobald diese im Modell implementiert und getestet sind, werde ich darüber wieder berichten.

matthias.hornsteiner@yandex.ru

Literatur und Bezugsquellen

- [1] Wetterzentrale: Top Karten. www.wetterzentrale.de/topkarten
- [2] Behrendt, R.; Mahlke, H.: Die ganze Welt in Wetterkarten. www.wetter3.de
- [3] Hepburn, W.: Radio & TV DX Information Centre. www.dxfocentre.com
- [4] Grandjean, P., F5LEN: Refractive index forecast. <http://cluster.f5len.org/index.php?p=tropo>
- [5] ITU: The radio refractive index: its formula and refractivity data. www.itu.int/rec/R-REC-P.453/en
- [6] National Weather Service: National Centers for Environmental Prediction. www.ncep.noaa.gov
- [7] Institute of Global Environment and Society: Grid Analysis and Display System. www.iges.org/grads
- [8] Sampol, G., EA6VQ: DXMAPS 2.6 - QSO/SWL real time maps. www.dxmaps.com
- [9] Mischlewski, B. J., DF2ZC: Überreichweiten im September. FUNKAMATEUR 62 (2013) H. 11, S. 1524 (UKW-QTC)

Vorüberlegungen zur Verbesserung des Modells

Für ein Gasgemisch lässt sich die Abweichung des Brechungsindex n von 1 mithilfe der sogenannten Sellmaier-Gleichung

$$n - 1 = \sum_i \rho_i \left(A_i + \frac{B_i}{T} \right) \quad (4)$$

darstellen. ρ_i ist die Dichte der jeweiligen Gaskomponente (z. B. Sauerstoff, Stickstoff, Kohlendioxid). A_i und B_i sind empirisch zu bestimmende Konstanten.

Terme mit A_i beziehen sich auf Gaskonstituenten ohne permanentes Dipolmoment, Anteile mit B_i gehören zu Komponenten mit permanentem Dipolmoment (in der Erdatmosphäre ist das überwiegend das H_2O -Molekül).

Bei Molekülen ohne permanentes Dipolmoment vermag das elektromagnetische Feld der Radiowelle eine Verschiebungspolarisation in der Elektronenhülle auszulösen (vereinfacht ausgedrückt heißt das, dass die Schwerpunkte der positiven und negativen Ladungen nicht mehr zusammenfallen).

Liegt dagegen ein permanentes Dipolmoment vor, so kann eine Orientierungspolarisation auftreten: Die Dipolmoleküle richten sich nach dem externen Feld aus. Diese Ausrichtung geht umso schwerer vonstatten, je stärker die thermische Unruhe der Moleküle ist (d. h. je höher die Temperatur ist). Daher ist die Orientierungspolarisation umgekehrt proportional zur Temperatur, siehe der zweite Term in Gleichung (4).

Kommen wir zur Dichte ρ . Gemäß dem Gesetz für ideale Gase gilt:

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5)$$

mit R als der Gaskonstante. Mit dem Begriff ideales Gas bezeichnet man eine idealisierte Modellvorstellung eines realen Gases. Man geht von einer großen Anzahl von Teilchen in ungeordneter Bewegung aus, wobei als einzige Wechselwirkung der Teilchen nur Stöße untereinander in Betracht kommen (oder mit den Wänden, sofern vorhanden). Die Dichte ist also proportional zu p/T und zusammen mit der oben erwähnten Temperaturabhängigkeit der B_i -Terme ergibt sich insgesamt eine $1/T^2$ -Abhängigkeit.

Aus den Gleichungen (4) und (5) erhalten wir schließlich Gleichung (3).

Hier habe ich nun folgende Kritikpunkte:

– Der N_{dry} -Anteil bezieht sich auf die trockene Atmosphäre, in der Wasserdampf sowie Flüssig- und Eiswasser nicht in Betracht gezogen werden. Allerdings umfasst der Luftdruck p alle Partialdrücke wie $p(\text{O}_2)$, $p(\text{N}_2)$, $p(\text{CO}_2)$ und damit auch den Teildruck des Wasserdampfs. Dies ist ein Widerspruch in sich, der Dampfdruck ist schließlich im Term N_{wet} zu berücksichtigen! Daher müsste man p durch p_d ersetzen, den Partialdruck der trockenen Luft:

$$p_d = p - e \quad (6)$$

– Die $1/T^2$ -Abhängigkeit im Feuchterm spiegelt nicht die volle Wahrheit wieder. Aufgrund von Resonanzeffekten beim H_2O -Molekül bedarf es eines Korrekturterms, der proportional zu $1/T$ ist. Beide Terme haben unterschiedliche Vorfaktoren, die wiederum empirisch zu bestimmen sind.

– Die Herleitung der Brechungsindexgleichung erfolgte unter der Annahme, dass die Atmosphäre ein ideales Gas sei. Das stimmt nur in guter Näherung, bei genauerer Betrachtung sind auch hier Korrekturterme notwendig.

Ich möchte einige weitere Aspekte erwähnen, weil sie in der Fachliteratur selten Beachtung finden:

– Der Koeffizient 77,6 in Gleichung (3) hängt von der chemischen Zusammensetzung der Erdatmosphäre ab. Während die Konzentration von Stickstoff (N_2) und Sauerstoff (O_2) als konstant angenommen werden darf, ist die CO_2 -Konzentration jahreszeitlichen Schwankungen unterworfen. Daraus resultiert übrigens die Jahreszeitenabhängigkeit der pflanzlichen Photosyntheseaktivität. Darüber hinaus existieren langfristige Trends, die derzeit von einer Zunahme der CO_2 -Konzentration geprägt sind. Achtung, hierbei handelt es sich um eine Folge von Klimaschwankungen! Keineswegs ist der Trend eine Ursache des angeblichen „Klimawandels“, denn dazu sind die Konzentrationsänderungen von CO_2 viel zu niedrig. Man beachte, dass von allen bekannten Treibhausgasen CO_2 das mit Abstand schwächste Treibhauseffektpotenzial aufweist.

– Streng genommen müssten wir auch die Konzentrationen von Flüssig- und Eiswasser berücksichtigen.