

# Thunderstorm effects on sporadic E propagation in 144 MHz

by **Volker Grassmann (DF5AI)**, **Sabine Cremer (DL1DBC)**, **Udo Langenohl (DK5YA)**, **Allard Munters (PE1NWL)**, **Gabriel Sampol (EA6VQ)**, **Joachim Kraft (DL8HCZ)**

## 1 Introduction

Do thunderstorms create sporadic E layers enabling long distance VHF communication? KYRIAZIS (5B4AZ), for example, claims that sporadic E clouds located over the Balkans north of Greece are “strongly related” to “big [thunderstorm] formations” in that region [26]. We may even find radio amateurs considering a more general relationship between the weather and sporadic E activity in 144 MHz. GYDE (ZL3NE), for example, considers sporadic E propagation in 144 MHz a general misinterpretation, i.e. he denies all long distance sporadic E QSOs in Australia and New Zealand and interprets all this QSOs by tropospheric propagation [11], [12]. Many radio amateurs remain sceptical though. GRAYER (G3NAQ), for example, notes that none of the claimed connections between thunderstorms and sporadic E “have yet been demonstrated with scientific conviction” [5]. HAWK (*AM and FM Dxr's resource*) concludes that thunderstorm effects on sporadic E “is a theory that refuses to die” [24]. Dealing with this subject may even result in harsh reactions, from professionals (see, e.g., [32]) and from radio amateurs too (see, e.g., [33]).

The authors of this paper were also sceptical and reluctant in accepting any relationship between thunderstorms and sporadic E activity. The weather and thunderstorms on one hand and sporadic E on the other hand represent very different geophysical phenomena vertically separated by 90 to 100 kilometers in very different regions of the Earth atmosphere. Furthermore, we are not aware of any study demonstrating a convincing correlation between the spatiotemporal occurrence of thunderstorms and 144 MHz sporadic E dx propagation. From this perspective, there is little reason to breathe new life in a theory which is supposed to die but refuses to do so.

In early 2004, one of us (DF5AI) has suggested a data analysis project to compare 144 MHz sporadic data (i.e. dx information from radio amateurs) with *sferic* observations in meteorology (i.e. burstlike radio emissions from lightnings). This suggestion was motivated by two reasons: first, by using the benefits from the internet, radio amateurs may easily access meteorological data and sporadic E reports for data analysis purposes; second, he believed the above theory may be settled once and for all by demonstrating the failure of correlation between the data sets. CREMER (DL1DBC) has very soon initiated our project team, has implemented appropriate software tools and has managed the legal requirements for accessing commercial weather data.

To address the most important question of this paper already here: no, we haven't found clear evidence for thunderstorm-triggered sporadic E events, i.e. we cannot demonstrate a convincing correlation between 144 MHz dx QSOs and *sferic* data in the 2004 sporadic E season. From this perspective, we may now contribute to the burial of the theory – we won't. This does not mean, in no case, we consider thunderstorm effects on 144 MHz sporadic E propagation an existing phenomenon which still awaits its discovery. However, in the spectrum of arguments, i.e. between *yes* and *no* (where we have initially started at the *no* position), we were forced to consider a *maybe* too. In our view, there are more details which need to be examined and clarified before closing the case:

- We learnt from scientific resources that thunderstorm effects on the ionosphere are indeed seriously discussed by atmospheric scientists (see chapter 3.1).
- The *GPS/MET radio occultation experiment* shows an impressive statistical correlation between convection processes in the lower atmosphere and electron density irregularities in the E region of the ionosphere (see chapter 3.2).
- *OH nightglow* measurements demonstrate the impact of severe thunderstorms on the mesosphere in 85 kilometers height (see chapter 3.3). We may therefore speculate about similar effects on the ionosphere as well.
- We became aware that our current data analysis method must be possibly considered no appropriate tool, i.e. it has directed our studies in the wrong direction, perhaps. Hence, the above mentioned failure of correlation does not reflect final results because alternative analysis methods need to be considered too but have not been implemented yet (see chapter 4.4).

- Finally, we have found a striking example of sporadic E and spheric data which strongly motivates further analyses in this subject (see chapter 4.3).

Thus, we currently do not feel in a position to form final judgement at this stage of investigation and we wonder if somebody can. This paper therefore documents our current understanding, it addresses open questions and it discusses thoughts and ideas to solve the puzzle. We also wish to encourage fellow radio amateurs to conduct their own studies because we consider this subject a fascinating element in the world of amateur radio propagation studies.

## 2 Geophysical background information

### 2.1 Neutrals, ions and electrons in the ionosphere

Less than a thousandth of the atmospheric constituents are ionized in the ionosphere, i.e. neutral particles still dominate the chemical composition even in a fully developed E or F layer. To distinguish between the neutral and charged particles in the ionosphere, scientists generally refer to the *neutral gas*, the *ion gas* and the *electron gas*, respectively (altogether referred to as the *ionospheric plasma*). The ion gas is strongly coupled to the neutral gas, i.e. bulk motions of the neutral particles (e.g. high atmospheric winds) also affect the ion motion because of particle collisions transferring energy and momentum from the neutrals to the ions. The ions, on the other hand, drag the electrons by electrostatic forces, i.e. the dynamical behaviour of the ions (which are controlled by the neutrals) is also present in the electron gas. This is the reason, by the way, why radars may examine neutral particle dynamics in the upper atmosphere by detecting radiowaves scattered by the electrons.

However, the charged particles are also affected by electrostatic fields in the ionosphere and by the Earth magnetic field, i.e. mechanical and electromagnetic forces both control the ion and electron motion. This leads to a large variety of complex physical effects and phenomena. In the F region of the ionosphere (200 to 400 kilometers), the thin neutral atmosphere results in a small ion-neutral collision frequency, i.e. the ion motion is primarily controlled by electromagnetic forces (the so-called  $E \times B$  drift) rather than particle collisions. In the E region (90 to 110 kilometers), on the other hand, the neutral atmosphere is relatively dense<sup>1</sup> resulting in frequent ion-neutral collisions, i.e. the ion motion is very much affected by particle collisions contrary to the small electrons which still experience the dominating role of electromagnetic forces. In consequence, the ion drift and the electron drift may differ significantly in speed and direction resulting in charge separation associated with electric fields which again lead to various complex phenomena in the E region of the ionosphere, e.g. *plasma instabilities* which may cause strong backscatter of radiowaves.

Referring to the above terms, we may argue that thunderstorm related effects originate in the neutral component of the lower atmosphere (which is an obvious statement because the lower atmosphere shows no ion and electron components similar to the ionosphere). Sporadic E, on the other hand, represents a phenomenon of the ion and electron gas around 100 and 110 km height (the term *sporadic E* actually denotes short-term enhancements of the ion and electron density in the E region of the ionosphere). Discussing the possibility of thunderstorm effects on sporadic E, we may therefore speculate about the existence of two independent mechanisms, i.e.:

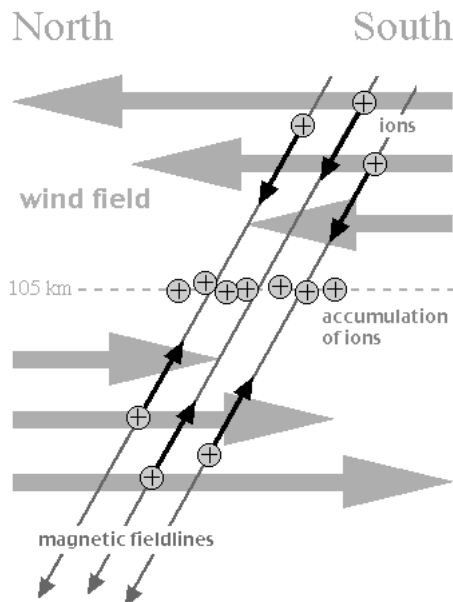
- A vertically directed *transport process* which transports those thunderstorm effects from the lower into the upper atmosphere, somehow. Because thunderstorms represent a feature of the atmosphere's neutral gas component, we may speculate that the E region signature of thunderstorms is initially visible in the ionosphere's neutral gas component only. Thus, the postulated transport process may be considered an exclusive feature of the neutral atmosphere, we therefore do not need to take the ions and electrons into consideration here.
- A *coupling process* which transforms the thunderstorm's signature in the neutral gas component into ion and electron density enhancements in order to generate sporadic E layers. This coupling process is effective within the E region of the ionosphere, i.e. we do not need to take large scale transport processes into consideration here (the local neutral, ion and electron drift will play a dominant role though).

---

<sup>1</sup> Note that space scientists consider 100 kilometers the height where the Earth atmosphere ends and where space begins. This definition amuses many scientists in ionospheric physics because of the high particle density at E layer heights and even above. In fact, the upper atmosphere between, say 100 and 500 kilometers shows a large variety of phenomena (e.g. winds and tides) which wouldn't exist in a space vacuum and, in consequence, high atmospheric friction prevents satellites from orbiting around Earth at 100 kilometers height.

## 2.2 The wind shear theory

Sporadic E layers contain a considerable amount of long-lived metallic ions (i.e.  $\text{Fe}^+$  and  $\text{Mg}^+$  besides  $\text{O}_2^+$  and  $\text{NO}^+$ , the usual dominant ions at E region height) which are transported efficiently by wind fields, e.g. by tides in the upper atmosphere which exist similar to the tides in the oceans. In fact, the ion motion is very much controlled by the bulk motion of the neutral particles due to ion-neutral collisions as described above. At convergent nulls of the wind speed (see the broken line in **Fig. 2.1**), the ions may accumulate in dense sporadic E layers. However, convergent nulls (i.e. the height-dependent reversal of the wind speed) must not be considered the only wind shear scenario that can create sporadic E layers.



**Fig. 2.1.** Horizontal wind shear creating a sporadic E layer by wind speed reversal (northern hemisphere). The wind field denotes bulk motions of the neutral particles which collide with the positive ions in the E region of the ionosphere causing momentum and energy transfer from the neutrals to the ions. Being charged particles in a magnetic field, the ions can only spiral upwards or downwards along the Earth magnetic fieldlines depending on the actual wind direction. Assuming a reversal of the meridional wind direction (wind shear) from south-north to north-south with descending height, the ions may accumulate in a dense sporadic E layer (broken line).

This so-called *wind shear theory* has been developed by WHITEHEAD (1961), AXFORD (1963) and others and has been featured in many amateur radio articles too, see, e.g., [5]. Because the vertical ion velocity is proportional to the cosine of the *dip angle* (i.e. the inclination of the local Earth magnetic fieldlines), it has been argued that the wind shear mechanism is more or less ineffective in polar latitudes where the dip angle is large. It is also ineffective over the magnetic equator where the horizontal magnetic field lines can hardly generate vertical ion displacements. The wind shear model therefore appears applicable only in mid-latitudes<sup>2</sup> and is here accepted as one cause of sporadic E layers. However, with this model there is now a need to explain the origin of metallic ions<sup>3</sup> and the cause of wind shears in the E region of the ionosphere. In this paper, we cannot discuss the wind shear model's benefits and complications in detail but wish to emphasize that even the accumulation of ions and electrons cannot fully explain the origin of strong backscatter echoes at very high frequencies without taking further considerations into account too (see the discussion further below and a separate paper which will appear on the *Amateur Radio Propagation Studies* webpage [47]).

Nevertheless, the wind shear model can fulfil the requirement of the above mentioned coupling process (see chapter 2.1) because it represents a feature of the neutral atmosphere which can modify the density distribution of the ions and electrons in the E region of the ionosphere, i.e. neutral particle dynamics is identified a driving element in the generation of sporadic E layers.

Note that the wind shear model is only one of many which all wish to explain the generation of sporadic E layers. Another model, for example, refers to *sporadic neutral layers* which were discovered twenty years ago, i.e. layers of sodium and other chemical species "with a thickness between a few hundred meters and several kilometers ... in the same height range as ionospheric sporadic E" [8]. Those sporadic neutral layers "are undoubtedly related to sporadic E although, at a given location and time, the presence of one does not necessitate the existence of the other" [8]. These layers also appear associated with atmospheric waves which indeed play an important role in the lower and upper atmosphere.

## 2.3 Wave phenomena in the Earth atmosphere

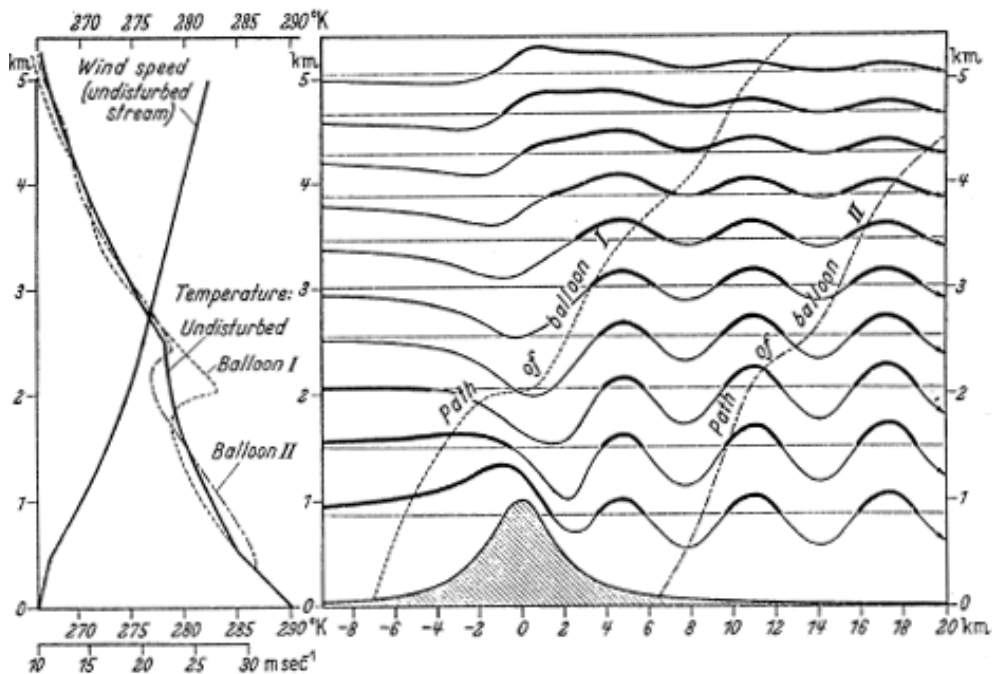
Smooth ripples on the sea surface, giant waves breaking on the shore, *tsunamis* travelling at high speed and slowly varying oscillations of global wavelength (i.e. tides) all represent wave phenomena in the oceans. Note that all these waves show different

<sup>2</sup> Recent analyses however indicate the model's relevance also in polar latitudes, see [25].

<sup>3</sup> The presence of metal ions in the E region of the ionosphere is interpreted, for example, by meteorites and cometary material deposited in the Earth's upper atmosphere, see, e.g., [6].

properties and features, are created by different mechanisms, are affected by different parameters and, finally, are described by different mathematical models. Thus, we are not facing the same type of waves at different scale lengths but we are facing waves of different characteristics and of different physical nature – in fact, we may find a large variety of wave phenomena in the oceans.

The Earth atmosphere is often referred to as the *atmospheric ocean*, it shows a variety of phenomena which do not exist in the real ocean though (e.g. charge separation in the ionosphere), we may nevertheless find a large variety of wave phenomena in the atmosphere too. We all know, for example, short wavelength pressure oscillations propagating in the air, i.e. acoustic waves which represent an example of the so-called *internal waves*.



**Fig. 2.2.** Air flow over a mountain ridge generating a train of lee waves aloft. See [13] and the references cited therein.

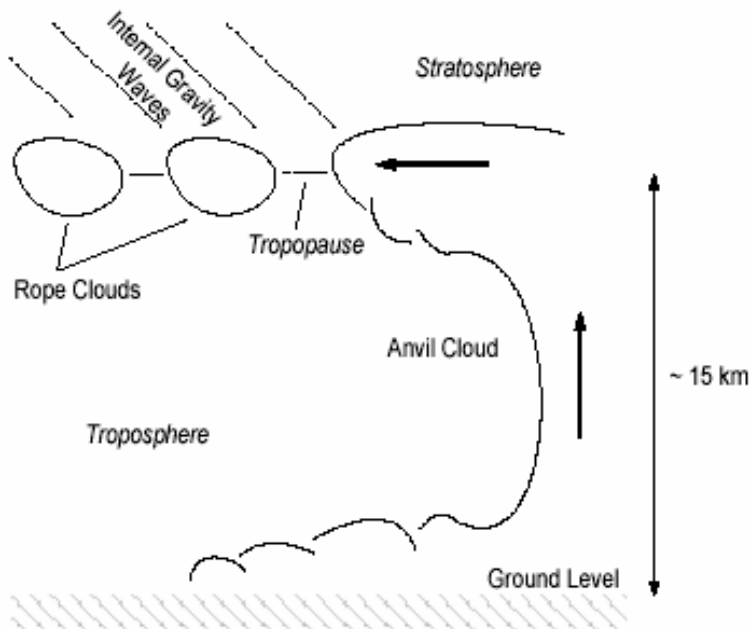
Another example of internal waves is represented by *atmospheric gravity waves* (AGW), i.e. oscillations of air parcels caused by the lifting force of buoyancy and the restoring force of gravity<sup>4</sup>. Those waves were first described by HINES in a landmark paper in 1960 [1] (see also HINES' personal notes in [4] and the introductions, e.g., in [22] and [23]). Since then gravity waves have been exhaustively studied both experimentally and theoretically by many research groups and it became obvious that gravity waves play a dominant role in atmospheric physics. The so-called *travelling ionospheric disturbances* (TID), for example, were finally interpreted by the ionospheric manifestation of atmospheric gravity waves travelling in the neutral atmosphere, see, e.g., [7].

The nomenclature considers *large scale gravity waves* with periods of 30 minutes to 3 hours and wavelengths of thousands of kilometers, *medium scale AGW* with periods between, say 15 minutes and 1 hour and wavelengths of several hundred kilometers and the *small scale gravity waves* showing periods around 3 and 5 minutes [3]. Gravity waves are generated in various heights and by various mechanisms, e.g. by horizontal air flows streaming across mountains (i.e. the so-called *mountain or lee waves* in the lower troposphere, see **Fig. 2.2**), by convection processes and wind shears in the upper troposphere and lower stratosphere, by *Joule heating* originating from electron particle precipitation in the polar ionosphere during geomagnetic disturbances and by many other atmospheric phenomena too.

## 2.4 Convectively generated gravity waves

In the scope of this paper, we are in particular interested in convectively generated gravity waves. Severe thunderstorms are associated with strong convection that can create gravity waves in the full range of phase speeds, wave frequencies and vertical and horizontal scales [20] by strong updrafts causing air parcels to overshoot the equilibrium level and breaking through the tropopause causing oscillations by *buoyant disturbances*, see, e.g. [21] and [23]. In a more elaborated picture, the requirement of a horizontally stratified atmosphere must be taken into consideration in order to describe the generation and propagation of gravity waves properly. This leads to a more or less complex scenario along the interface between the strongly stratified stratosphere and the weakly stratified troposphere, see **Fig. 2.3**.

<sup>4</sup> Note that atmospheric gravity waves have nothing in common with ALBERT EINSTEIN's gravitational waves. The term *gravity wave* results from the important role of the mathematical quantity  $g$ , i.e. the Earth's gravity acceleration which appears in the mathematical framework describing this type of atmospheric waves. The corresponding German term is, by the way, *Schwerewelle*.



**Fig. 2.3.** Gravity wave generation along the interface between the strongly stratified stratosphere and the weakly stratified troposphere associated with a tall anvil cloud, from [31].

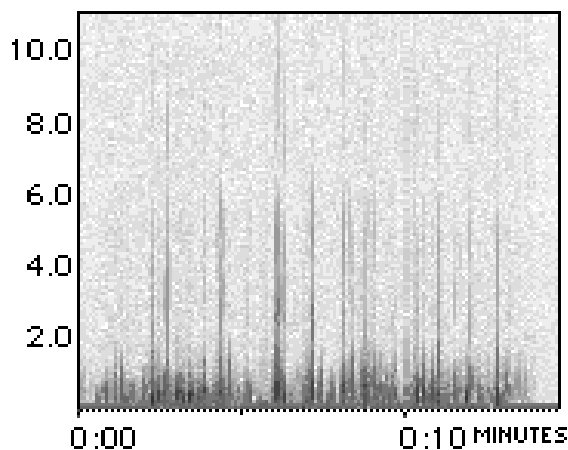
Gravity waves may also originate from individual *cumulonimbus* which act as transient heat sources of 10 to 30 minutes duration [30]. Those gravity waves have broad frequency spectra, its high-frequency components show large vertical group velocities and are observed only for short duration and at short distances from the convective source. At longer times and at longer distances from the heat source, the wave components show short vertical wavelengths and relatively slow group velocities, i.e. these components are more likely to be observed but their contribution to momentum transfer into the upper atmosphere is less than that of high-frequency waves [30].

In the scope of this paper, gravity waves may be interpreted as the vertically directed transport process which has been postulated in chapter 2.1 in order to explain the possibility of thunderstorm effects on the ionosphere. In fact, severe thunderstorms may create convectively generated gravity waves which may travel from the lower atmosphere into altitudes of at least 85 km, see chapter 3.1 and chapter 3.3.

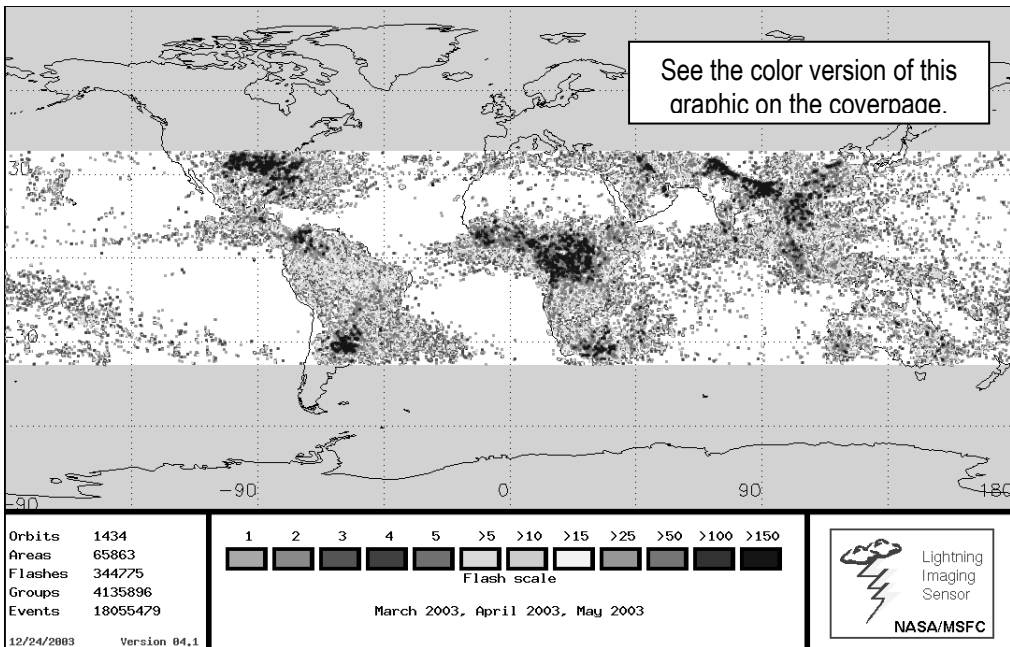
## 2.5 Sferics and global thunderstorm activity

Thunderstorm discharges represent the main source of atmospheric disturbances in radio communication. On a global perspective, we find 1.000 to 2.000 simultaneous thunderstorms creating 20 to 100 lightning strikes every second [2]. Each strike creates a radio burst (the so-called *sferic*) of 100 microsecond to 1 millisecond duration ( $t_0$ ). The corresponding mean radio spectrum is more or less constant below  $f = 1/t_0$ , at high frequencies it decays with  $1/f$  [2].

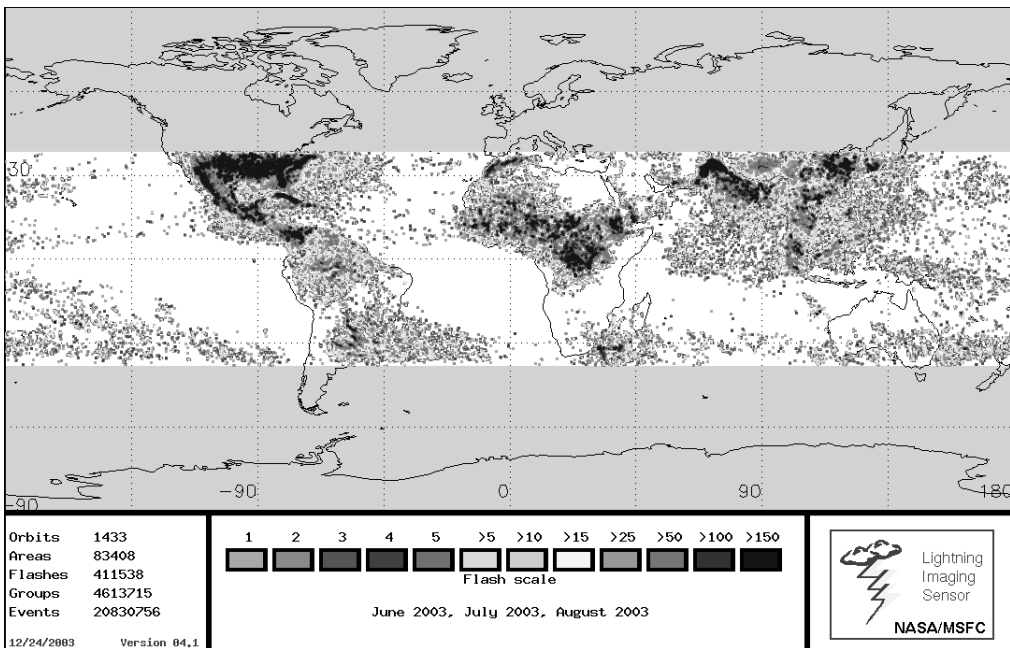
A useful introduction to sferics and VLF radio observations is given, for example, by NASA's *INSPIRE* project [35] which also distributes software for data recording, filtering and spectral analyses. Triangulating the sferic's azimuth by using low-frequency radio receivers with direction finding capabilities, the lightning stroke's geographical position may be measured quite accurately. This information is used, for example, by insurance companies, meteorologists and by geophysicists studying dynamical processes in the atmosphere.



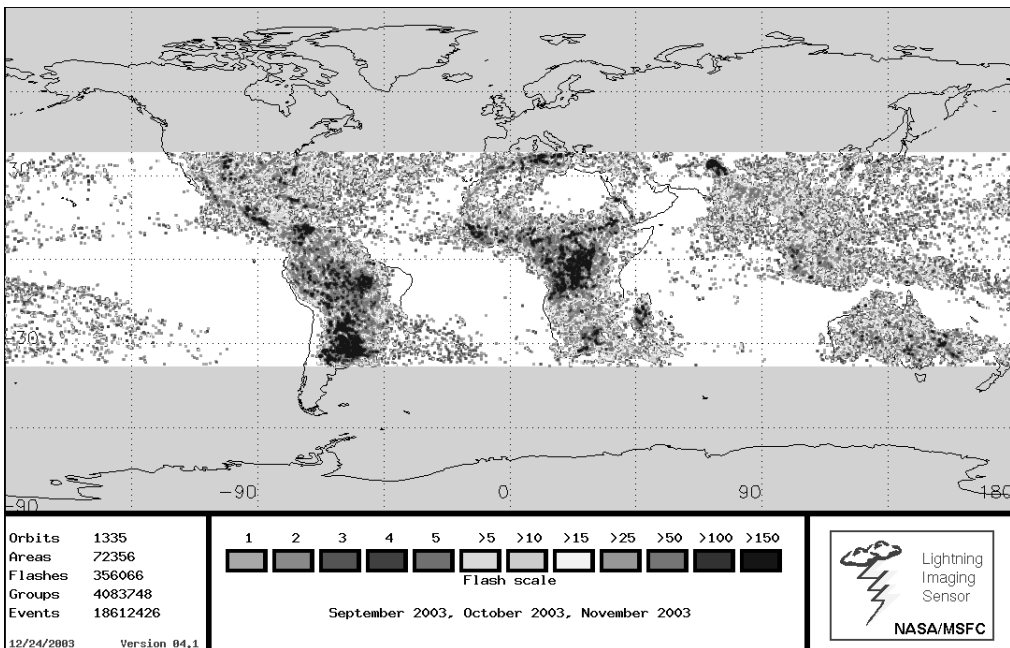
**Fig. 2.4.** Audio spectrum (zero to 10 kHz) of low-frequency radio bursts emitted by lightnings (*sferics*). Each of the vertical lines denotes a lightning stroke within a distance of a few hundred to one thousand kilometers from the radio sensor. Adopted from [35].



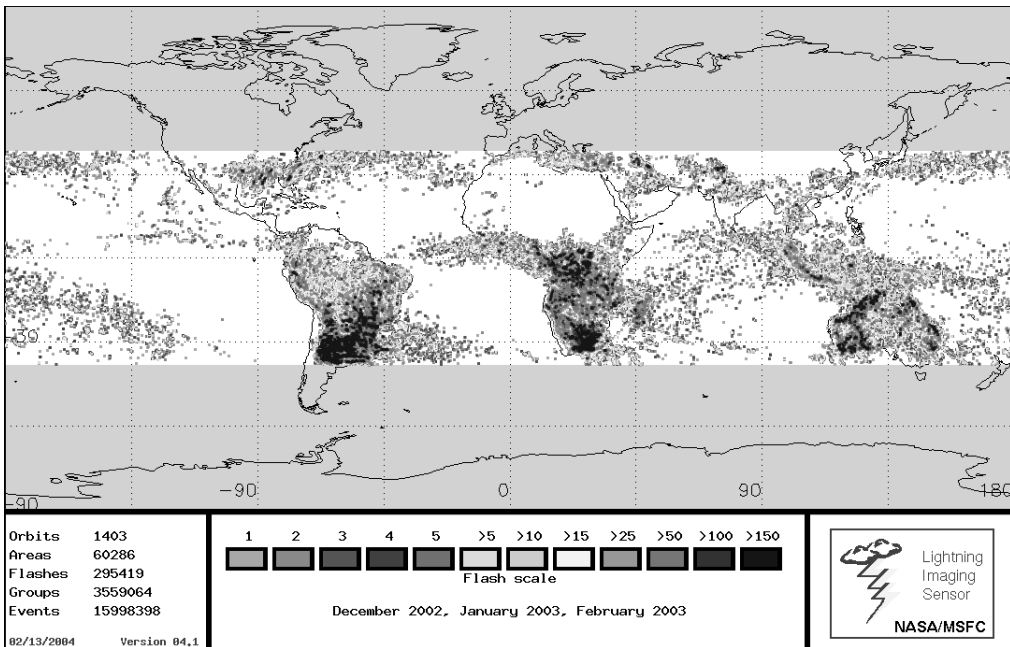
**Fig. 2.5.** Global lightning distribution during spring 2003 [38].



**Fig. 2.6.** Global lightning distribution during summer 2003 [38].



**Fig. 2.7.** Global lightning distribution during fall 2003 [38].



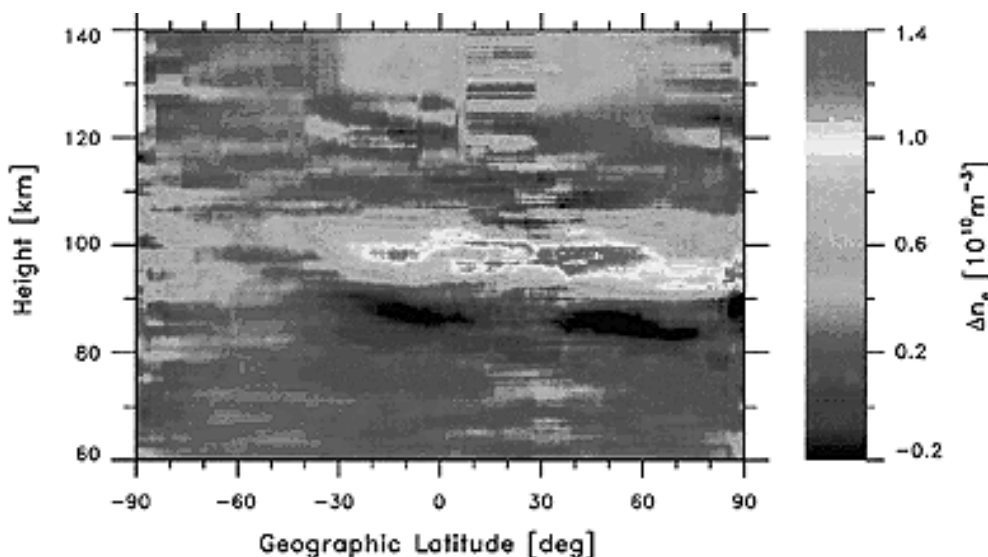
**Fig. 2.8.** Global lightning distribution during winter 2003 [38].

**Fig. 2.5** to **Fig. 2.8** display the lightning activity in tropical latitudes during 2003. The tropics are in particular important in the scope of this paper because intense convection and intense thunderstorms may be best observed in this geographic region. Note that the belt of maximum thunderstorm activity oscillates around the equator during the year in accordance to the annual motion of the sun which is seen, for example, when comparing the thunderstorm activity in the western USA and China with southern Brazil and Argentina.

## 2.6 Seasonal and latitudinal variations of sporadic E

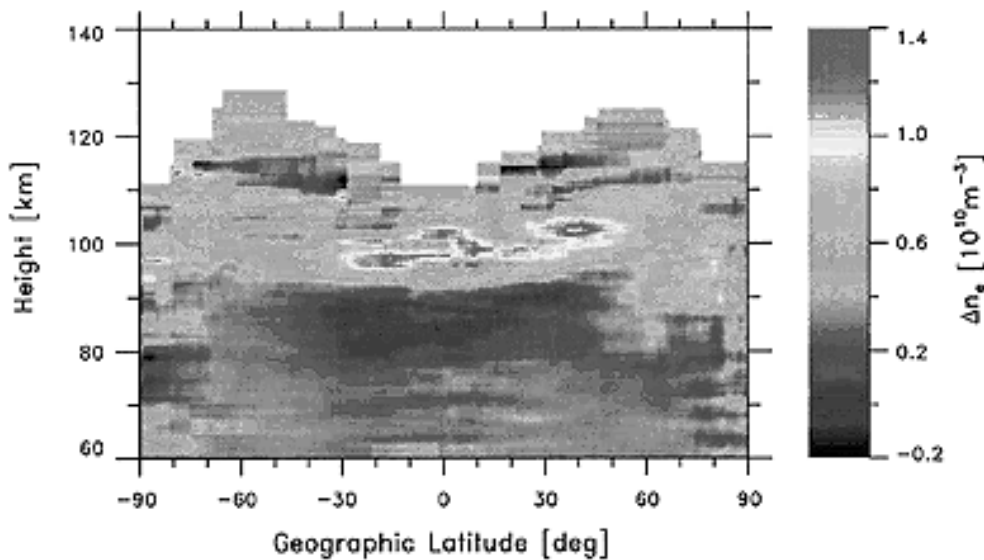
In paragraph 3.2 we will discuss the GPS/MET radio occultation experiment which can detect layered structures in the upper atmosphere with horizontal scales of around 100 km and vertical scales of a few hundred meters at the Earth's limb [19]. This experiment can therefore provide information on the vertical structure of sporadic E and its seasonal variation. **Fig. 2.9** to **Fig. 2.11** display the vertical distribution of electron density irregularities which are considered a measure for sporadic E occurrence.

**Fig. 2.9** displays the data from June/July 1995 with a band of sporadic E activity between 30° southern latitude and 60° northern latitude. The sporadic E height varies between, say 95 and 105 km including intermediate layers separated by around 6 km which are best seen between 0° and 30° northern latitude. HOCKE et al. [19] interpret this feature by the signature of “the vertical wavelength of the atmospheric waves forming these ionization layers.” Note also the layers occurring at high geographic latitudes which are interpreted by *Polar Mesospheric Summer Echoes* (PSME) [19]. By comparing **Fig. 2.9** (June/July) to **Fig. 2.10** (October) and **Fig. 2.11** (February), we can see the sporadic E activity moving from northern to southern latitudes during the year similar to the latitudinal variation observed in thunderstorm activity.



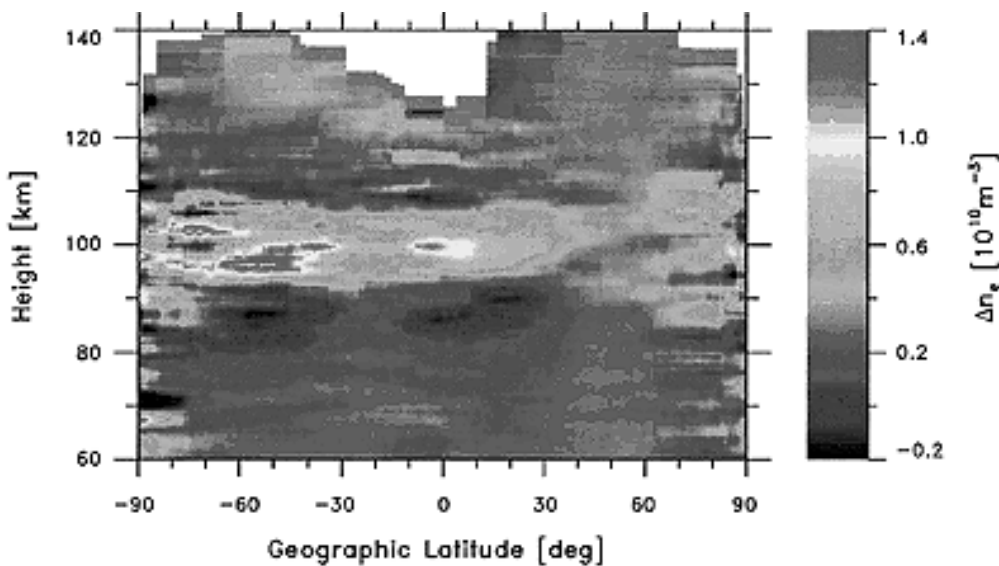
**Fig. 2.9.** Sporadic E occurrence for June 19 to July 10, 1995, from [19].

See the color version of this graphic on the coverage.



**Fig. 2.10.** Sporadic E occurrence for October 10-25, 1995, from [19].

See the color version of this graphic on the coverage page.



**Fig. 2.11.** Sporadic E occurrence for February 2-16, 1997, from [19].

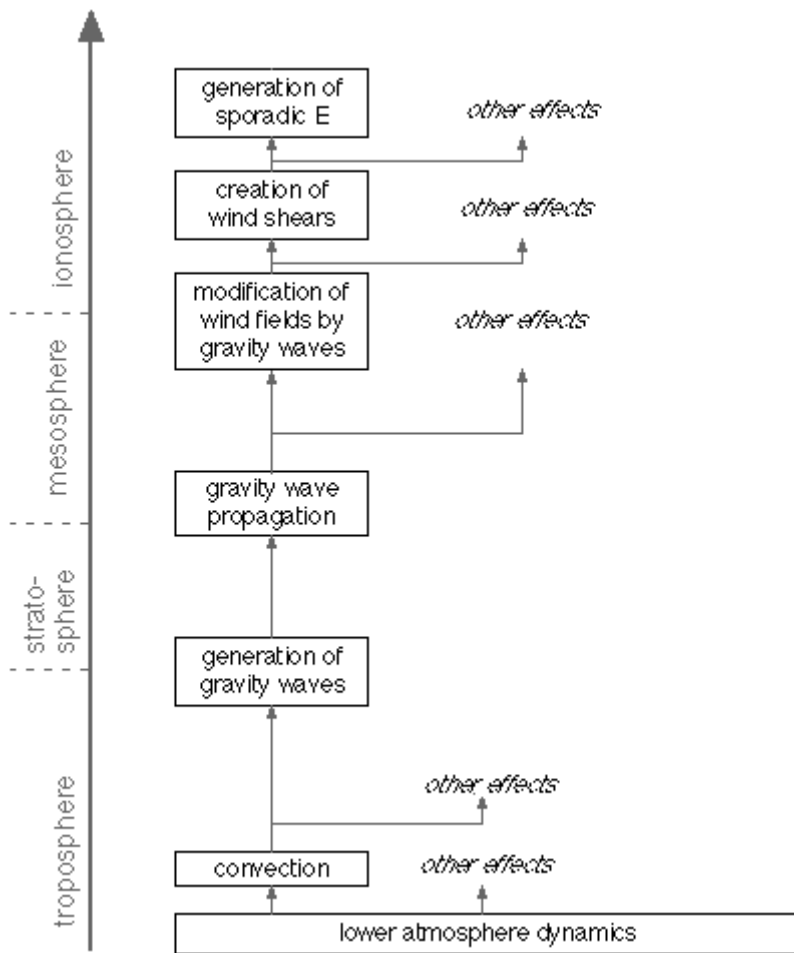
See the color version of this graphic on the coverage page.

### 3 Possible model of thunderstorm effects on sporadic E

#### 3.1 Assembling the puzzle

The above details represent pieces of a puzzle which may be assembled to a quite complicated model of thunderstorm effects on the ionosphere. The model has been discussed in scientific literature (unfortunately, we couldn't identify the original source) and even in ham radio, see, e.g., [5]. **Fig. 3.1** is an attempt at visualizing the scenario which links sporadic E activity in the ionosphere to lower atmosphere dynamics. There is perhaps reason not to be fully happy with this schematic diagram but it may demonstrate the principle idea behind the model.

Intense atmospheric convection breaking the tropopause (which separates the troposphere from the stratosphere) is considered the driving element in the generation of those type of gravity waves which in particular attract our interest, i.e. convectively generated gravity waves. These gravity waves may propagate from the lower stratosphere into the mesosphere (this feature is verified by observation, see chapter 3.3) and may even arrive at E region level around 100 kilometers height (which appears verified by statistical analyses, see chapter 3.2). Representing an oscillatory perturbation of the neutral wind field, the gravity waves may support the generation of wind shears which are considered a possible cause of sporadic E. Thus, in this model sporadic E layers are associated with gravity waves originating in the lower atmosphere and propagating into the ionosphere.



**Fig. 3.1.** Schematic diagram displaying the possible link between lower atmospheric dynamics and the generation of sporadic E in the ionosphere.

This model appears plausible to many scientists but it isn't yet verified in all aspects, as far as we can see. This doesn't appear a surprising result because the study of thunderstorm effects on the ionosphere requires interdisciplinary cooperation between meteorologists and ionospheric scientists which wasn't available in the past. In fact, both disciplines appear to have little in common but this view has significantly changed in recent years. Meteorological model calculations (which were initially restricted to the troposphere) now attempt to model the influence of the middle atmosphere as well, i.e. meteorologists are more and more interested looking at processes occurring above the troposphere. Ionospheric research, on the other hand, has also broadened its scope considerably by taking mesospheric and even magnetospheric effects on the ionosphere into account too. Many scientists therefore refer to *upper atmospheric physics* rather than *ionospheric physics* to document the change of view.

In the following paragraphs, examples of scientific results are given which support the above model, i.e. the GPS/MET radio occultation experiment and optical observation of gravity waves associated with a severe thunderstorm. In chapter 3.4 we will examine the differences between the scientific approach and the radio amateur's perspective in this subject.

## 3.2 Example 1: E region irregularities over tropical convection zones

### 3.2.1 The GPS/MET radio occultation experiment

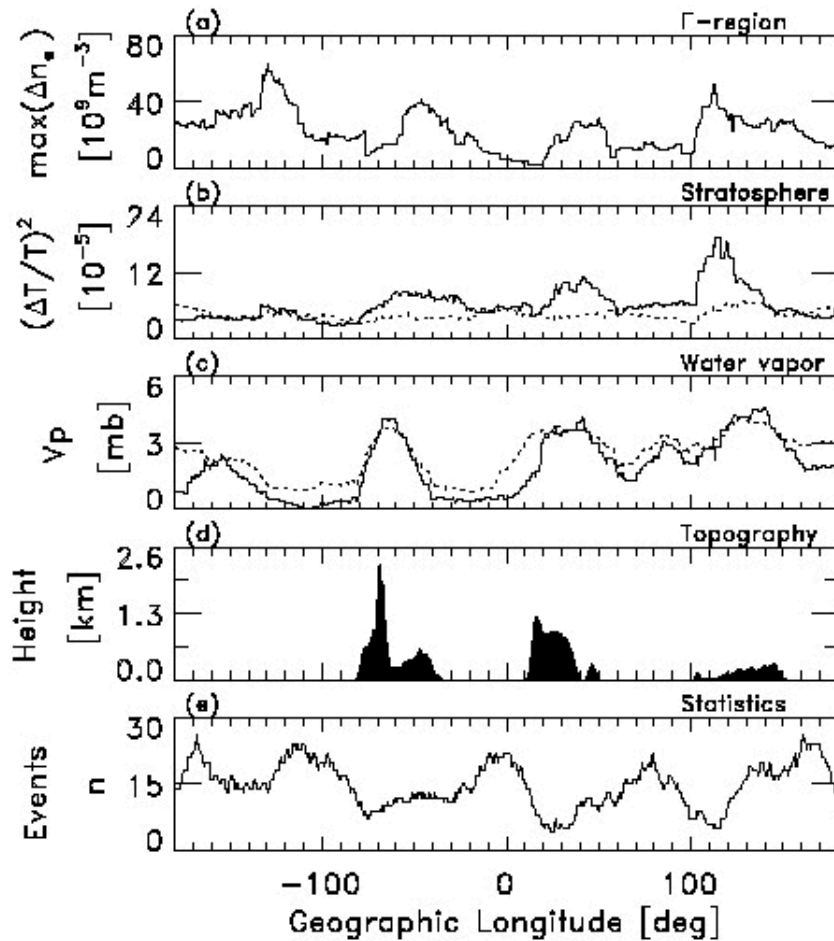
Similar to radio occultation experiments for studying planetary atmospheres in radio astronomy, the GPS/MET program uses the 24 satellites of the *Global Positioning System* (GPS) for active remote sensing of the Earth atmosphere. A receiver aboard of a *Low Earth Orbit* (LEO) satellite tracks the 1575.42 MHz and 1227.6 MHz radio signals originating from GPS satellites occulted by the Earth atmosphere, i.e. the GPS signals travel through the dense layers of the atmosphere along a tangent to the Earth's surface. The LEO satellite can observe more than 500 radio occultations per day which provides information on the vertical structure of the Earth atmosphere in various geographical regions of the world (more information on this experiment is available on the GPS/MET web site [36]).

### 3.2.2 Analysis of the February 1997 prime-time data

HOCKE and TSUDA [18] have analysed GPS/MET observations of the tropical atmosphere during February 1997, i.e. during the so-called *prime-time* where the encryption of the GPS signals (anti spoofing) was turned off to support best data quality. The results are considered relevant to this paper because intense solar radiation in the tropics cause strong cumulous convections

which excite various atmospheric waves, atmospheric tides and gravity waves transporting energy and momentum from the lower into the upper atmosphere [28].

**Fig. 3.2** displays the GPS/MET results summarized over ten days between 5° and 25° southern latitude as a function of geographical longitude. The lower panel (e) shows the number of occultation events analysed. Panel d displays the Earth surface topography, i.e. the black peaks correspond to high mountains in Brazil (80° W), Africa (40° E) and Indonesia (120° E), respectively. Curve c denotes the average water vapor pressure in the troposphere between 4 and 6 km altitude. Note that water vapor clouds at higher tropospheric altitudes indicate an increase of tropical convection, i.e. this panel provides a measure of the intensity of tropical convection and convectively generated gravity waves. Panel b shows the relative temperature variance  $(\Delta T/\bar{T})^2$  in the stratosphere where the solid and dotted line refer to the height of 22-28 km and 32-38 km, respectively. These curves may be considered a measure for gravity wave activity modulating the stratosphere's background temperature. Finally, the maximum of the small-scale fluctuation amplitude (vertical scale less than 7 km) of electron density between 80 and 120 km altitude is displayed in panel a.



**Fig. 3.2.** Various parameters of the southern tropics as a function of geographical longitude during GPS/MET prime-time in February 1997, from [18]. See text for more details.

The results provide an impressive indication of E region irregularities correlating with dynamic processes in the lower atmosphere. The high correlation between the data curves may be interpreted by enhanced gravity wave activity in the lower stratosphere (22-28km, see the solid line in panel b) associated to areas of strong tropical convection in the troposphere (4-6 km, see panel c). The correlation between gravity waves (panel b) and E region irregularities (panel a) suggests “convergence of electron density occurring due to the wind shear, associated with gravity waves and geomagnetic effects” [28].

However, referring to the dotted line in panel b, we find little gravity wave activity in 32-38 km altitude and the correlation with all the other curves is rather low, in fact. Similar changes, by the way, are also reported from GPS/MET data observed at northern mid-latitudes, i.e. high gravity wave activity in the lower stratosphere around 25 km altitude but low activity around 35 km [27]. In [18], this feature is considered an indication of gravity waves created by tropospheric rather than stratospheric sources which raises an important question in our view: attributing the generation of sporadic E to gravity waves travelling from the troposphere (or, alternatively, from the lower stratosphere) into the E region of the ionosphere, we would expect detection of gravity waves at all intermediate heights which is evidently not the case here. Thus, gravity wave activity around 25 km height shows correlation with E region irregularities but gravity wave activity around 35 km doesn't – this feature is difficult to understand in our view (in chapter 3.2.5 we will discuss more open questions in the interpretation of the GPS/MET data). However, GPS/MET data can also provide data examples in which sporadic E is clearly correlated with gravity wave activity in the lower and in the upper stratosphere as well (see, e.g., figure 7 in [28]).

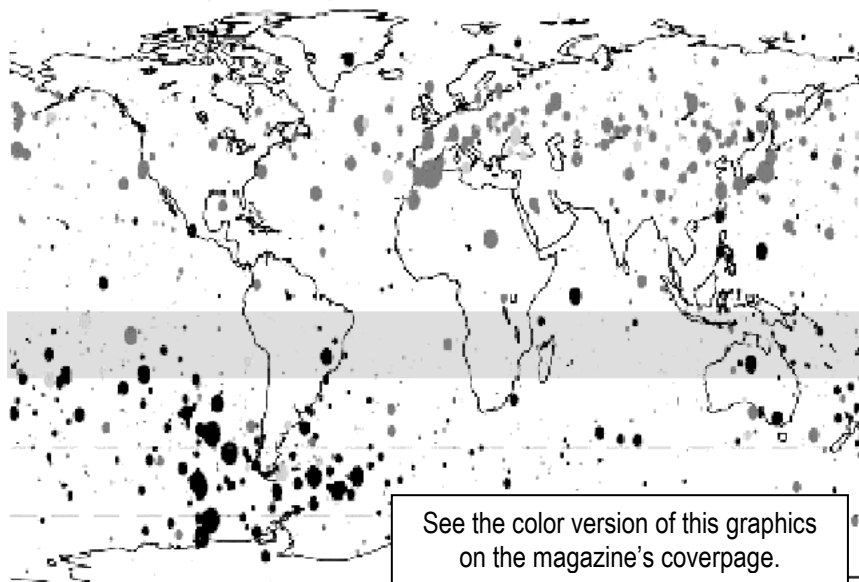
### 3.2.3 Orographic effects

Another important feature of the GPS/MET data addresses the generation of sporadic E associated with orographic features, i.e. high mountains acting as obstacles in the low atmospheric air flow. The distribution of gravity wave activity (see panel b in **Fig. 3.2**) shows in particular maxima over mountain ridges (see panel d and also figure 7 in [28]) which suggests “wave generation by the interaction of surface wind with topographical obstacles” [27]. However, the results communicated in [27] (which are not shown here), also mentions significant gravity wave activity in the lower stratosphere over the Atlantic Ocean and Eurasia which cannot be explained by orographic effects, obviously (see also the discussion in chapter 3.2.5).

Radio amateurs have also discussed the geographical correlation between sporadic E and high mountains but were forced to accept that orographic effects can hardly explain the geographical distribution of sporadic E in Europe, see, e.g. [5]. GRAYER, G3NAQ, therefore concludes that the effect of mountains on the generation of sporadic E – assuming it would exist – is “clearly rather small” [5]. Thus, GPS/MET data and amateur radio observations provide the same inconsistent picture, i.e. examples in which sporadic E appears correlated to mountain ridges and, on the other hand, counter-examples which do not support this assumption at all.

### 3.2.4 Geographical distribution of E region irregularities

**Fig. 3.3** shows a summary of electron density irregularities in the lower ionosphere observed by GPS/MET in 1995 and 1997 (compare to **Fig. 2.9** to **Fig. 2.11** on page 15 and 16, respectively). Note, in particular, the observations over southern Spain and north-western Africa. Unfortunately, no data is available showing all the parameters similar to **Fig. 3.2**, i.e. we cannot compare the sporadic E activity in **Fig. 3.3** neither with water vapor pressure data in the troposphere nor with temperature variances in the stratosphere.



**Fig. 3.3.** Electron density irregularities observed by GPS/MET [28]. Each dot indicates a radio occultation event, its radius denotes the corresponding electron density enhancement at 105-110 km height. Red dots are observed in June/July 1995, green dots are in October 1995 and blue dots are in February 1997. The gray band comprises the data apparently used in **Fig. 3.2**.

### 3.2.5 Comments

The data displayed in **Fig. 3.2** is apparently identical to the blue dots located in the gray band of **Fig. 3.3** because both figures refer to prime-time data from February 1997. Thus, we may compare the data within the gray band of **Fig. 3.3** to the features displayed in **Fig. 3.2**. Doing so, we are facing a couple of questions which we currently cannot solve at all.

- We would expect, for example, full consistency between **Fig. 3.2** and **Fig. 3.3** with respect to the longitudinal distribution of electron density irregularities, i.e. between the peaks of the quantity  $\max(\Delta n_e)$  in panel a of **Fig. 3.2** and the horizontal distribution and size of the blue dots within the gray band of **Fig. 3.3**, respectively. However, no such conformance becomes visible to us in the data.
- The same is true when considering the orographic features suggested by panel d in **Fig. 3.2** because we cannot identify appropriate counterparts in **Fig. 3.3**, i.e. the blue dots do not appear accumulated in geographical regions in which high mountains exist.
- Furthermore, in accordance to **Fig. 3.3** the most intense electron density irregularities are found around the southern tip of South America which does not indicate any special importance of high mountains (e.g. the Andes) contrary to panel d in **Fig. 3.2**. In our view, the massive concentration of blue dots around Tierra del Fuego (50° southern latitude) simply reflects the high season of sporadic E occurrence in the southern hemisphere around February.
- In fact, considering all data in **Fig. 3.3**, the distribution of data points seems to reflect the known latitudinal variance of sporadic E during the year without showing centers of activity in the tropical regions which, in our view, is inconsistent with the results shown in **Fig. 3.2**.

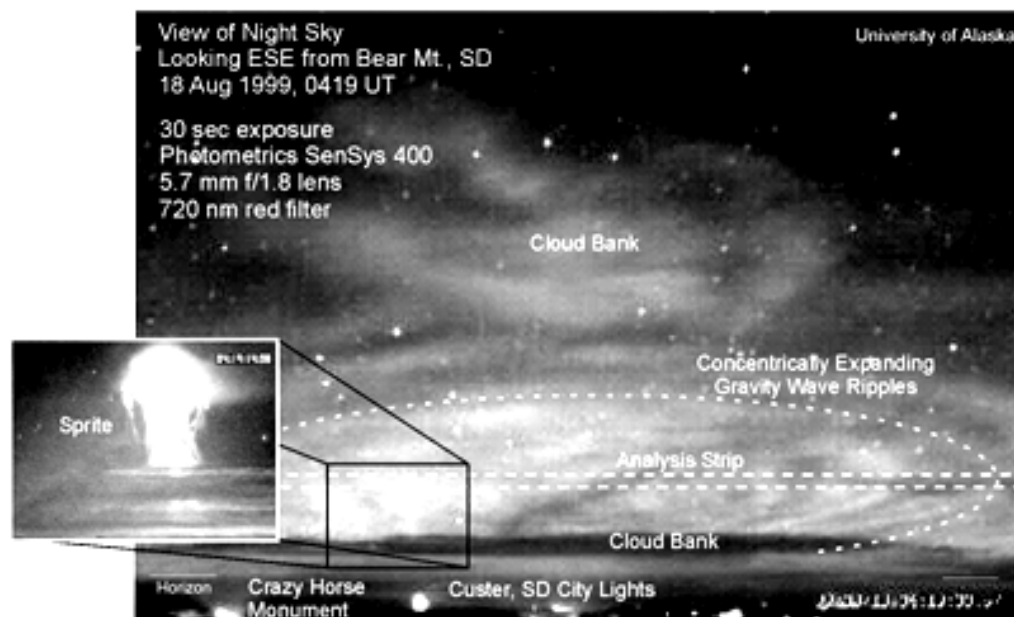
Thus, words of caution appear justified to prevent incorrect conclusions because we currently cannot understand **Fig. 3.2** together with **Fig. 3.3**. In our view, tropospheric convection and, in consequence, gravity waves may indeed play an important role in the generation of sporadic E (which is supported by the impressive results shown in **Fig. 3.2**) but, on the other hand, we are reluctant to interpret all sporadic E occurrences by gravity waves without considering alternative mechanisms and processes too (which appears supported by **Fig. 3.3**, in our view).

It is also worth to mention that the term *sporadic E* is used synonymous for *electron density irregularities* and vice versa in [18] but it is doubtful that the quantity  $\max(\Delta n_e)$  indeed provides a direct measure of sporadic E activity as described by 144 MHz radio amateurs. Note that the maximum amplitude of  $\max(\Delta n_e)$  is less than  $80 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$ , see panel a in **Fig. 3.2**, which corresponds to only one hundredth, or so, of the total electron density in a fully developed E layer insufficient to explain sporadic E propagation on very high frequencies. In [19], the term sporadic E is considered “a name convention in the science community which does not fit to the thin ionization layers observed in the D, E and F1 regions” – this statement indeed indicates that the term sporadic E does not address identical subjects when applied in GPS/MET data and in amateur radio, respectively.

We also got the impression that the analysis and geophysical interpretation of the GPS/MET results is still a matter of dynamical development and improvement (see, e.g., [37]). However, it is generally accepted that radio occultation experiments indeed bear high potential not only in the understanding of the weather and the Earth climate but also in studying atmospheric wave phenomena and processes affecting the upper atmosphere [17]. In the scope of this paper it means: we do not consider the GPS/MET data clear evidence for sporadic E dx propagation generated by thunderstorms but a valuable indication which motivates further analyses in this subject.

### 3.3 Example 2: Thunderstorms generating sprites and gravity waves

In around 85 kilometers height, we may find the OH nightglow layer created by vibrationally excited hydroxyl (OH) in the nighttime mesosphere as a result of a series of chemiluminescent reactions between odd oxygen and odd hydrogen species [29]. Gravity waves may modulate this infrared airglow in the night sky by generating ripples in the airglow distribution. Thus, by using suitable CCD cameras (see, e.g. [15] and [16]), the signature of gravity waves may be observed even by optical instruments. In this paragraph, we will discuss a spectacular event documented by the *University of Alaska* when studying a severe thunderstorm over Nebraska on August 18, 1999.



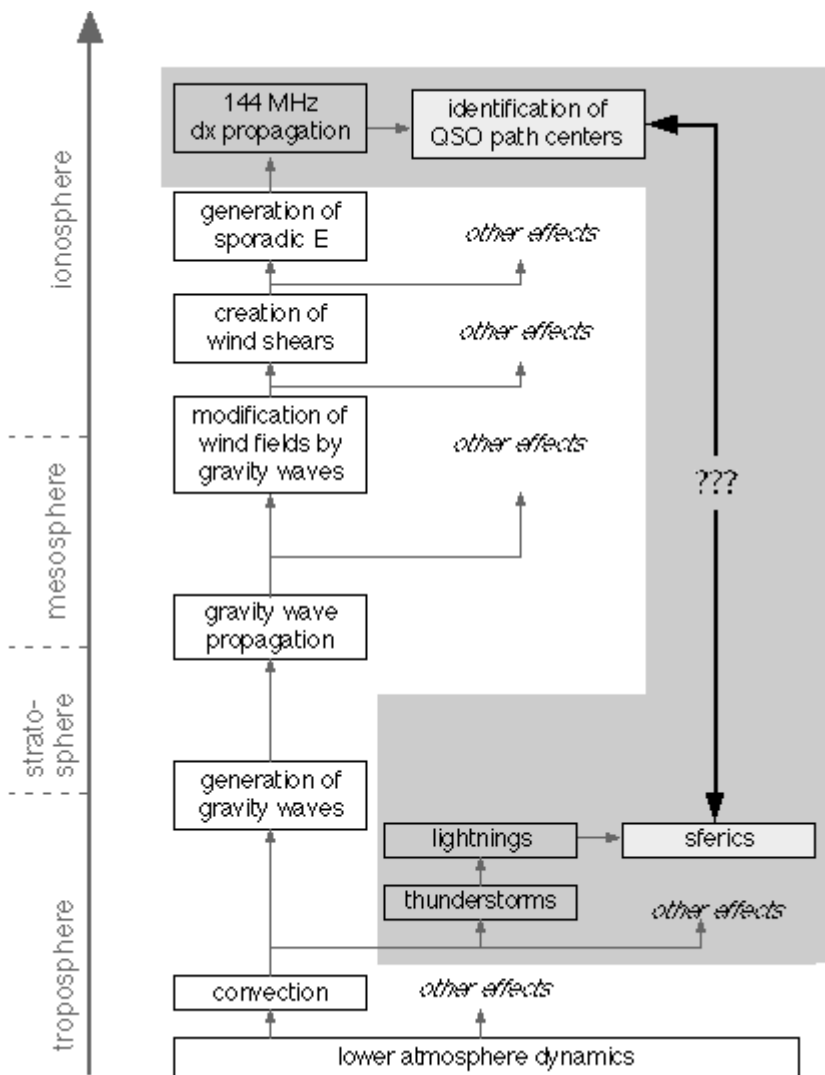
**Fig. 3.4.** Concentric ripples observed in OH airglow caused by thunderstorm triggered gravity waves propagating vertically to a height around 85 km. The sprite on the main page was also recorded by a separate CCD camera as shown in the inset. [29]

As part of a scientific campaign, SENTMAN et al. performed OH airglow observations at a U. S. Forest Service fire observation tower on Bear Mt., South Dakota. In this particular night, a very intense thunderstorm moved from south-central Nebraska to eastern Nebraska/Iowa along a storm track perpendicular to the observation line of sight. **Fig. 3.4** shows one of the CCD images displaying the night sky above the city lights of Custer (note also the display lights of the *Crazy Horse Monument* in the lower left corner). The inset shows a large *sprite* in high resolution, i.e. one of this recently discovered lightning discharges extending from the lower atmosphere into high altitudes at 50 to 90 kilometers (see, e.g. [9] and the references cited therein). The hazy elliptical feature in the lower central part displays the rippled signature of a gravity wave modulating the OH airglow. Analysing the full video sequence, “these elliptical features exhibit a distinctive outward propagation pattern originating from a well defined center” [29]. Mapping this features onto the horizontal plane and comparing the findings to the corresponding GOES weather map of the Nebraska storm, SENTMAN et al. found strong correlation between this gravity wave and the underlying thunderstorm [29].

Contrary to the GPS/MET data which reflects statistical results, this is an example of an explicit thunderstorm event (lower atmosphere) that causes gravity waves in the middle atmosphere in a height around 85 kilometers. This example demonstrates in particular that thunderstorm effects must not be considered restricted to the troposphere and stratosphere but may also affect higher altitudes more or less close to the E region of the ionosphere.

### 3.4 Scientific investigations versus ham radio studies

How do the speculations on thunderstorm effects on 144 MHz sporadic E propagation relate to the scientific results discussed above? First of all, we need to clarify the meaning of the terms *thunderstorm effects* and *144 MHz sporadic E*, respectively. From our perspective, the actual meaning of the term *thunderstorm effects* remains more or less unclear in ham radio discussions, i.e. all these speculations do not specify what property may actually support the generation of sporadic E. In fact, many radio amateurs seem to consider lightnings the driving force in the generation of sporadic E. This assumption is certainly not justified and has possibly contributed to the many sceptical comments on thunderstorm effects on 144 MHz sporadic E propagation. We may also find speculations considering those *sprites* and *jets* a possible trigger in the generation of sporadic E but all this recently discovered phenomena (see, e.g., [9] and the references cited therein) do not yet allow far-ranging conclusions at this early stage of investigation.



We are willing to admit that even our project's working title is perhaps misleading because thunderstorms do certainly not affect sporadic E layers directly. All what we may expect is the above mentioned *chain of cause and effects* (see chapter 3.1) with thunderstorms at one end and sporadic E dx propagation at the other end of the chain and a large variety of geophysical phenomena in between. Thus, thunderstorms may only be considered a tracer indicating dynamical processes in the lower atmosphere which may initiate a sequence of atmospheric effects that may possibly lead to sporadic E layers.

**Fig. 3.5.** Schematic diagram visualizing the radio amateur's approach to thunderstorm effects on ionospheric sporadic E. The white area denotes the scientific model, the gray area denotes additional elements discussed by radio amateurs.

The term *sporadic E* needs to be clarified as well. In the GPS/MET data and in ham radio, the term sporadic E apparently denotes different subjects, i.e. E region irregularities on one hand and 144 MHz long distance communication on the other hand (see the discussion in chapter 3.2.5). It is important to note that electron density irregularities in the E region of the ionosphere do not necessarily support forward scatter of radio waves on very high frequencies. Also, the presence of a sporadic E layer (i.e. enhanced electron density around 105 km) does not necessarily indicate the availability of sporadic E dx QSOs in VHF.

In fact, forward scatter of VHF radio waves must not be considered identical to ionospheric skip propagation similar to short radio waves below 30 MHz because such high electron density does not exist in the Earth's ionosphere. 144 MHz sporadic E QSOs are associated with complicated plasmaphysical processes which create various wave phenomena in the E region of the ionosphere capable to support *coherent scatter* of VHF radio waves at high field strengths. Contrary to the simple model of radio

waves reflected by an ionized media (which applies in short wave propagation), electrostatic fields in the E region, the Earth magnetic field and, in particular, the drift motion of the electrons and ions and particle collisions need to be considered in order to explain this scatter mode properly.

Considering the scientific material from above in the scope of this paper, we must therefore conclude that scientists and VHF radio amateurs are discussing similar but no identical subjects. Hence, the scientific material can provide valuable information but cannot prove what we are looking for, i.e. a possible link between thunderstorm activity and long distance QSOs in 144 MHz. **Fig. 3.5** makes an attempt at integrating the scientific results and ham radio speculations in a framework. The white area denotes the scientific model already discussed in **Fig. 3.1**, i.e. it shows the possible link between dynamical processes in the lower atmosphere and the generation of sporadic E irregularities. The gray area, on the other hand, considers those additional topics which were introduced by VHF radio amateurs, i.e. 144 MHz sporadic E and sferic activity, respectively. These additional elements are attached to both ends of the scientific model which we have called *chain of cause and effects* in chapter 3.1. Although this chain of cause and effects isn't yet verified in all aspects, radio amateurs apparently wish to extend this chain beyond its original limits.

**Fig. 3.5** may in particular indicate the principle difference between the scientific approach and ham radio studies: scientific instruments can investigate each individual chain link, may compare adjacent links and may analyse the entire chain of cause and effects systematically. Radio amateurs, on the other hand, can only address both ends of this chain, i.e. all the processes and mechanisms in between remain unknown to us. Because sporadic E events and sferic events are found in opposition on both ends of this chain, we can hardly expect strong correlation between these two features. In fact, if such a strong correlation would exist, thunderstorms would influence sporadic E dx propagation considerably which is not the case, obviously. Also, considering sferic observations a tracer of thunderstorms and thunderstorms a tracer of the dynamical processes which may create gravity waves, we must conclude that sferic observations can only provide a highly indirect measure of the geophysical phenomena which needs to be investigated.

Thus, radio amateurs are challenged by a complicated problem when exploring the possibility of thunderstorm effects on 144 MHz sporadic E propagation: our situation is very much described by a pilot navigating in an unknown airspace without reliable navigational instruments. Therefore, no guarantee is given that we may close this case in amateur radio propagation studies successfully, in one or the other direction.

## 4 The thunderstorm analysis project

### 4.1 The project team

The thunderstorm analysis project was launched in early 2004 and comprises six team members: CREMER, DL1DBC, develops and operates the data acquisition and data analysis software tools, maintains the data base and manages contacts to commercial weather information services providing actual sferic data. LANGENOHL, DK5YA, contributes sporadic E observations resulting from his European *sporadic E summary reports* [49] and he organizes access to weather information archives. MUTERS, PE1NWL, operates the *DXrobot* internet service [50], i.e. he can access the latest sporadic E information communicated by radio amateurs. The interconnection between his and CREMER's computer system exchanges data with short reaction times, see below. SAMPOL, EA6VQ, contributes his experience in the analysis of 144 MHz sporadic E openings and provides data and results originating from his studies [51]. KRAFT, DL8HCZ, editor of the *DUBUS* and *Funk-Telegramm* magazines, analyses ham radio publications relevant to this project and investigates the details of ham radio observations which need to be analysed in more detail. GRASSMANN, DF5AI, communicates the latest project status reports on the *Amateur Radio Propagation Studies* web site [47] and manages the contacts to the scientific community.

### 4.2 Data acquisition and data analysis

#### 4.2.1 General overview

The project benefits from existing infrastructure in the meteorological community and from various alerting and analysis services in the ham radio, see **Fig. 4.1**. Because of the high geographical density of VHF ham radio stations in Europe, radio amateurs can hardly fail detecting at least the majority of sporadic E events in the European sector which can support 144 MHz dx propagation. Thus, the ham radio community (see the upper left box) provides the raw data by uploading dx information to the OH9W/OH2AQ *dx cluster network* and by submitting logbook information, for example, to DK5YA's *sporadic E summary service* in the internet [49] (see the box in the center). The dx cluster information is permanently scanned by PE1NWL's *DXrobot* service

[50] which distributes dx alerts to emails, mobile phones and pagers (lower left box). This service also triggers DL1DBC's *Sferics Retriever* software which now downloads actual sporadic E and sferic data (see the central box at the bottom) from the internet. Thus, all relevant data concentrates on DL1DBC's computer system which finally launches the data analysis and graphical post processing routines (lower right box).

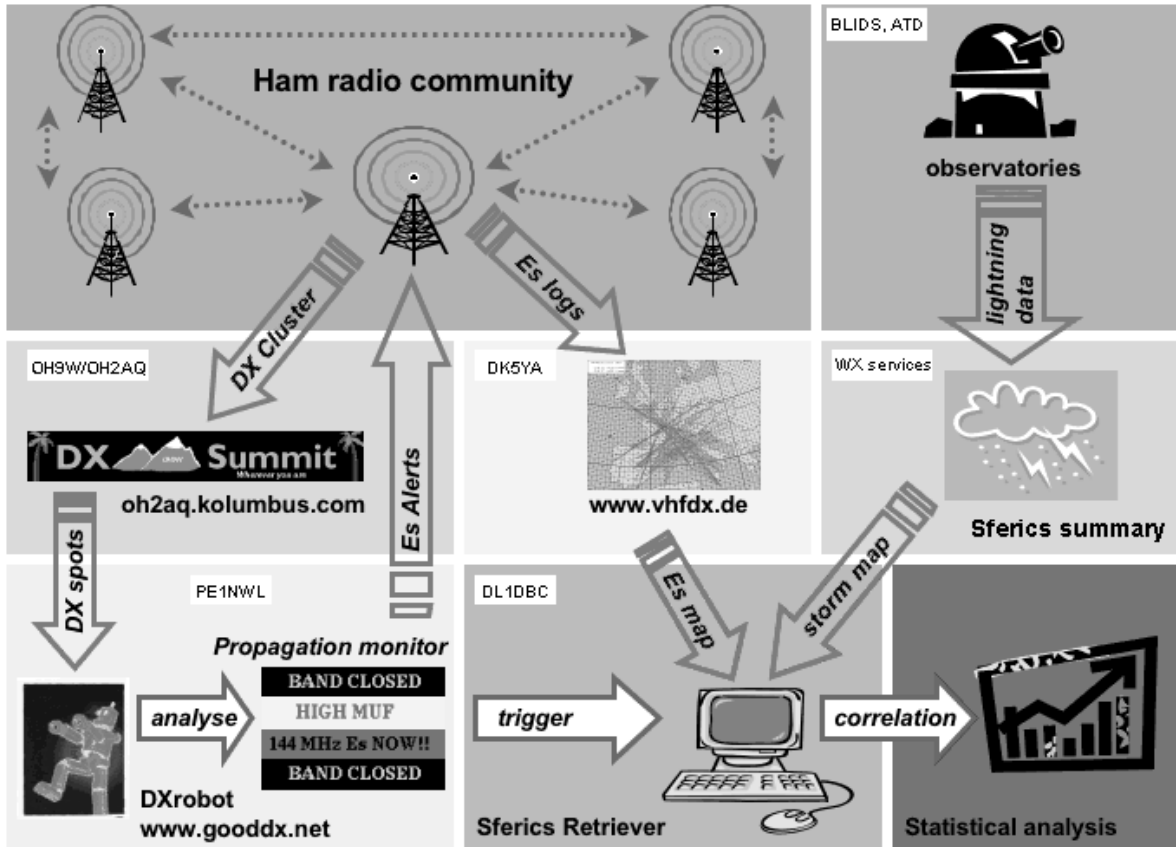


Fig. 4.1. Schematical diagram of the data flow in the thunderstorm analysis project.

#### 4.2.2 Sferic data

The sferic data is distributed by various weather services in the internet, see, e.g., the *Wetterzentrale* [40] and the *WetterOnline* [39] service which compile and analyse radio observation data, for example, from the *European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID)* [42], from the *Blitz Informationsdienst von Siemens (BLIDS)* [41] or, alternatively, from the *British Tornado and Storm Research Organisation (TORRO)* [43] which is a privately supported research body using data from the *ATD* system operated by the *UK Met Office* [44]. The BLIDS service, for example, operates sixty low-frequency radio sensors in Germany, Switzerland, France and neighbouring countries, the British service operates sensors in Cornwall, on the Shetland Islands and in overseas locations such as Iceland, Finland, the German North Sea coast, Gibraltar and Cyprus, respectively. The *British Met Office* specifies the geographical accuracy to be around five kilometers in the UK and between 20 and 100 kilometers in the rest of Europe. Before using sferic information from the internet, there is an important need to examine the service's individual data coverage carefully. The *Wetterzentrale* service, for example, provides data only for one half of every hour which affects data analyses considerably.

#### 4.2.3 Automatic data retrieval systems

All sferic data is directly retrieved from the relevant internet sources which generally reflects a just-in-time effort in order to take the data's transient nature into consideration. The data retrieval is maintained by a TCP client software which is triggered by PE1NWL's DXrobot service [50]. The DXrobot comprises two modules, i.e. a front end TCP client searching data patterns in the OH9W/OH2AQ dx cluster network [45] which might indicate an actual sporadic E dx event and, on the other hand, an alerting system which addresses radio amateurs subscribed to the DXrobot's mailing list. MUNTERS has also introduced a status table reflecting *quiet*, *high MUF* (i.e. high *maximum usable frequency*) and *E-skip alert* propagation conditions, respectively.

During the so-called *idle mode*, CREMER's Sferics Retriever software reads the DXrobot's status table every 15 minutes. In the case of a high MUF warning, the Sferics Retriever software initiates its pre-alert status which now accesses the DXrobot's status table every five minutes. When receiving the E-skip alert, the software activates its individual alert status which now addresses the internet weather services to transfer actual sferic data into a local SQL database. The DXrobot terminates the Sferics Retriever's alert status by indicating the end of the actual band opening. The Sferics Retriever software and all the other tools are written in the *Perl* programming language and are operated in a LINUX server environment.

#### 4.2.4 Sporadic E dx information

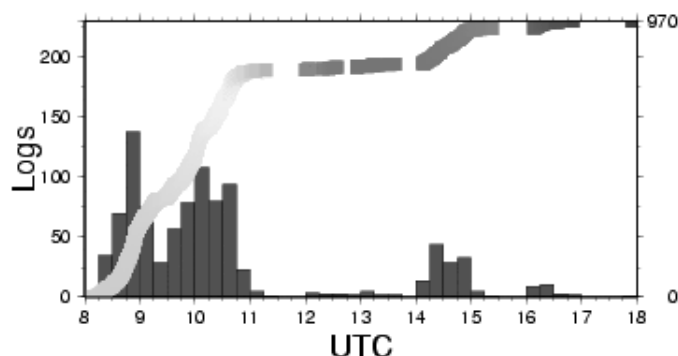
The team members LANGENOHL (DK5YA) and SAMPOL (EA6VQ) both operate web sites which compile and analyse VHF dx information from radio amateurs for many years (see [49] and [51], respectively). Their data was used in our studies when analysing 144 MHz dx QSOs from the 2004 sporadic E season. All data originates from the European community of VHF radio amateurs which represents a large number of radio operators submitting actual observation reports by uploading station logbooks and dx summaries.

However, ham radio logbooks show a large variety of data formats, i.e. the dx information cannot be uploaded into a database without a considerable amount of data pre-processing in order to identify, for example, the radio callsigns, UTC information, geographical coordinates (i.e. QTH locators), signal reports and other type of information. CREMER has therefore developed a Perl script which can read more than 97 percent of the dx information automatically, i.e. only the remaining three percent still require manual editing. Without this software tool, we couldn't manage our studies in reasonable time because of the large amount of dx information which needs to be analysed.

#### 4.2.5 Current data analysis tools

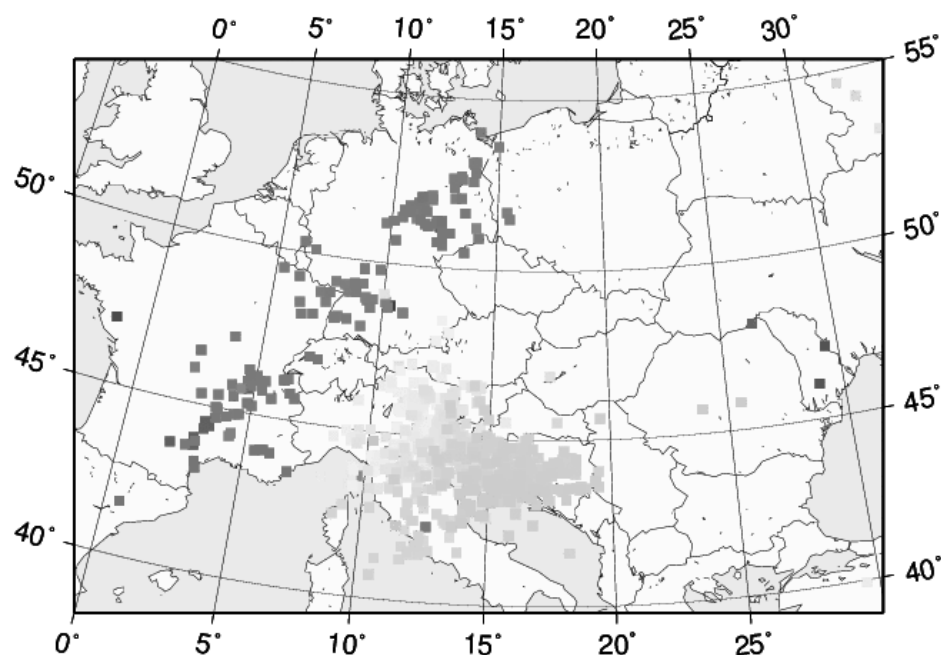
In the setup phase of the project, we have focused on geographical analyses using spheric distribution maps published in the internet (we have in particular used material from the *WetterOnline* service [39]). Note that the internet resources do not provide numerical information on the spherics' geographical position, i.e. those maps must be used "as they are" which limits our flexibility in graphical visualization considerably. The midpoints of the above mentioned sporadic E QSOs are finally plotted on the spheric data maps. We plan to implement a much broader spectrum of analysis tools in the future, one of this tools is discussed in chapter 4.4.

Fellow radio amateurs wishing to implement their own data analyses are advised to examine the internet maps carefully because the majority of internet weather services do not provide sufficient information on the actual map projection. Calculation routines and programming code may be found in various internet resources, see, e.g., [10] and [46]. We in particular consider the *General Mapping Tools* [34] very useful which are distributed by WESSEL and SMITH, University of Hawaii, under the *GNU General Public Licence* (see [34] and the references cited therein.)



**Fig. 4.2.** The June 27, 2004 sporadic E opening. The vertical bars denote the number of two-way dx QSOs per 15 minutes (left scale), the line denotes the accumulated number of QSOs during the day (right scale).

See the color version of this graphics on the coverage page.

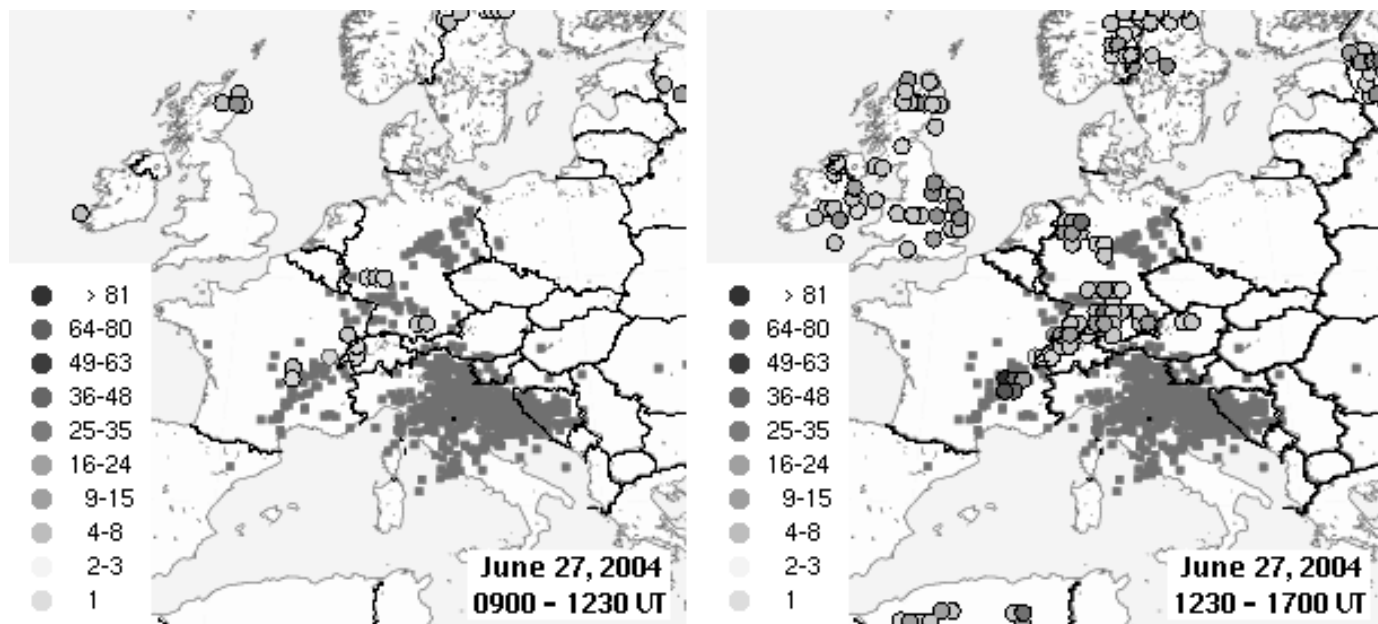


**Fig. 4.3.** QSO midpoints representing the geographical position of sporadic E on June 27, 2004. The color code is identical to Fig. 4.2, i.e. the red and purple positions correspond to dx QSOs between 12.30 and 15.30 UT.

See the color version of this graphics on the coverage page.

### 4.3 First results obtained during the sporadic E season 2004

In May/June 2004, the setup went operational but, unfortunately, we were facing few sporadic E dx events during 2004. However, we found an example of sporadic E activity which indeed attracts our interest in the scope of this paper, i.e. the sporadic E opening on June 27, 2004.



**Fig. 4.4.** Geographical distribution of sferics observed on June 27, 2004 at 0900-1230 UT (left) and 1230-1700 UT (right). The color code denotes the number of sferics per 30 minutes. Original data from [39], post processed data from [48]. See the color version of this graphics on the coverage page.

**Fig. 4.2** displays the distribution of 144 MHz dx QSOs during that day indicating various phases of sporadic E activity between 08 and 17 UT. By calculating the geographical center of the corresponding dx QSOs, we estimated the location of the actual scatter volume in the E region of the ionosphere, see **Fig. 4.3**. In the early hours (i.e. between 08 and 09 UT), the centers of sporadic E forward scatter were all located in a wide area in the Adriatic Sea (green) which has then moved towards northern Italy (yellow). In the afternoon, the geographical distribution of the sporadic E backscatter shows a remarkable feature, i.e. a band of activity extending over more than 1.500 kilometers from southern France to eastern Germany (red, purple) within a corridor of 200 to 400 kilometers width.

Referring to the sferics data distributed by the *Wetteronline* service [39], we found little sferic activity in central Europe between 08 and 12 UTC. No thunderstorm activity was in particular available close to the green and yellow scatter area, i.e. these sporadic E openings are definitely associated with no thunderstorm triggered effects.

However, beginning 12.30 UT the sferic activity has permanently increased and some areas show more than 60 sferic events per 30 minutes between 16 and 17 UT (a localized spot in central France even displays more than 80 sferics/30min which indicates severe thunderstorm activity). Surprisingly all these sferic events are more or less perfectly aligned along that red and purple band of sporadic E activity, see **Fig. 4.4** (readers may visit CREMER's webpage [48] which provides an animated sequence of this scenario).

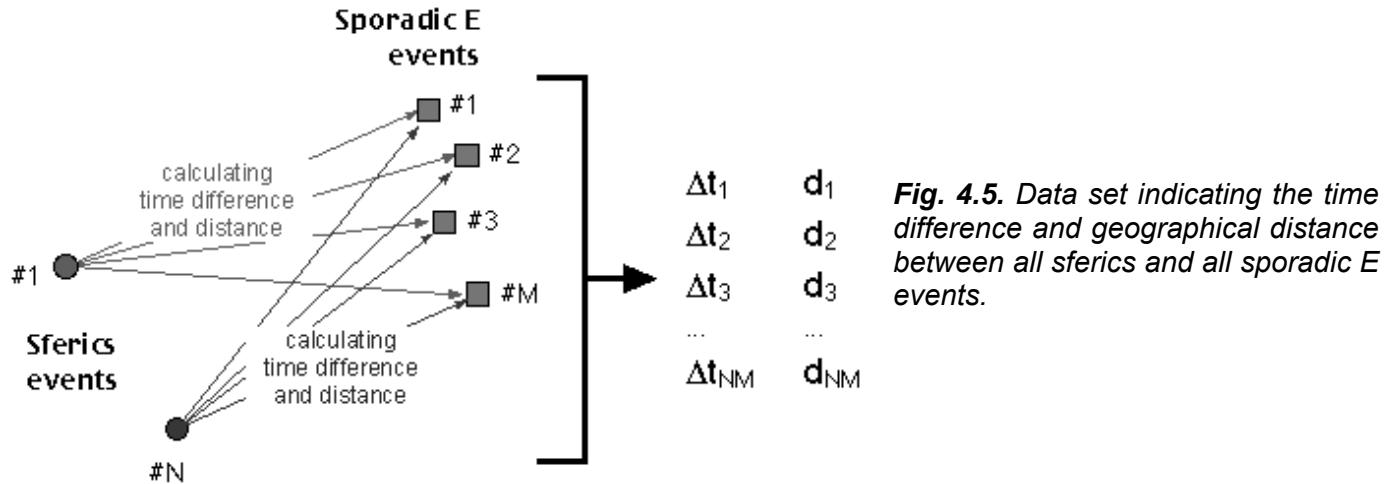
We are reluctant to cite this feature as evidence for 144 MHz sporadic E propagation triggered by thunderstorms because we cannot exclude an accidental occurrence of sferics and sporadic E activity in this example (in fact, central European thunderstorms indeed appear to be aligned from south-west to north-east quite often in summertime). Nevertheless, we consider this a striking feature which motivates further analyses in this subject.

### 4.4 Next steps in data analysis

Geographical presentations similar to **Fig. 4.3** and **Fig. 4.4** can certainly provide information on particular sferics and sporadic E events but cannot support statistical analyses dealing with long time series resulting from long-term observations. For example:

analysing all sporadic E events between, say 1990 and 2004, the many data points would overlap and would finally overload the map display destroying all systematical features in the graphics.

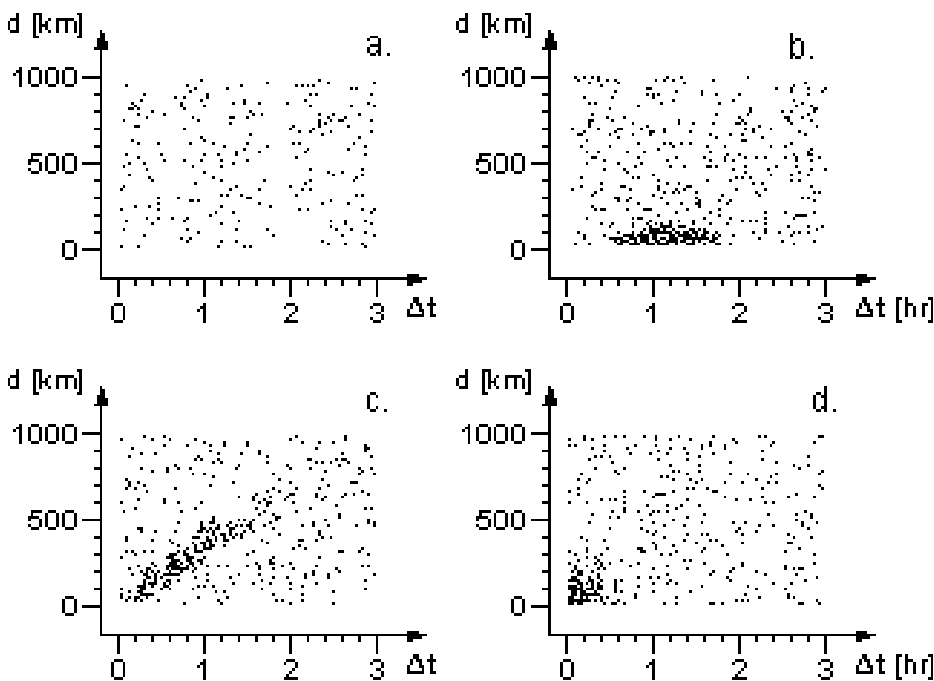
In our studies, we indeed consider statistical methods important because doubt will continue to exist when studying individual events only. **Fig. 4.5** therefore suggests an alternative approach: with each spheric event, we wish to calculate its individual time difference and geographical distance relative to all individual sporadic E events. Assuming the number of  $N$  spheric events and  $M$  sporadic events, the new data set will therefore comprise  $NM$  data records indicating the actual time difference  $\Delta t$  and the actual distance  $d$  between the corresponding sferics and the sporadic E event. With this transformation, geographical coordinates and UTC information may be replaced by relative information, i.e. by distances and time differences and all accessible data may now be plotted in only one diagram, see **Fig. 4.6**.



**Fig. 4.5.** Data set indicating the time difference and geographical distance between all sferics and all sporadic E events.

Assuming, sferics and sporadic E data would show no spatiotemporal correlation at all, the above procedure will result in a random distribution of data points (graphical noise) similar to panel a in **Fig. 4.6**. However, any existing correlation would indicate some sort of accumulation of data points as shown by fictive examples in the next panels. Panel b, for example, shows fictive data indicating sporadic E positions close to spheric positions associated with a variable time-delay. Scenarios of this type may be interpreted by gravity waves propagating in vertical direction from the lower into the upper atmosphere at variable speed. Panel c shows an example of gravity waves propagating in vertical and also in horizontal direction, i.e. the generation of sporadic E is time-delayed depending on the distance relative to the thunderstorm cells. Panel d, on the other hand, shows a fictive scenario in which sporadic E is generated more or less simultaneously to spheric activity and is located close to the spheric positions.

We cannot predict what pattern may be expected when using real data but we consider this method a potential tool for analysing long observation periods. Because the database is not yet available, we cannot present results at this stage of discussion, unfortunately. A practical complication results from the fact that we currently cannot access the sferics' numerical coordinates, i.e. we need to extract its geographical positions from map displays similar to **Fig. 4.4** which will involve complicated procedures in graphical post processing.



**Fig. 4.6.** Diagrams displaying the relative time difference and distance between sferics and sporadic E events. The plots show fictive data, see text.

## 5 Summary and concluding comments

The existence of thunderstorm effects on the ionosphere appears generally accepted in atmospheric sciences for three reasons:

- Various ionospheric effects are clearly associated with atmospheric gravity waves travelling in the E and F region of the ionosphere. Gravity waves are in particular considered one cause of wind shears around 100 km height which may stimulate the generation of sporadic E layers.
- Gravity waves originating in the troposphere and in the stratosphere may propagate upwards into the mesosphere (80 km) and, very likely, may also arrive at D and E region heights around 90 to 110 km.
- It is a well known fact that thunderstorms may create convectively generated gravity waves in the upper troposphere and in the lower stratosphere.

Scientists believe that these three individual effects may also occur in combination, at least partially. Hence, thunderstorms are interpreted the origin of gravity waves propagating from the lower into the upper atmosphere where they may create wind shears in the E region of the ionosphere which, finally, stimulate or support the generation of sporadic E. This model appears plausible to many scientists but, as far as we can see, it isn't yet verified in all aspects and details. However, scientific measurements provide strong indications leading in this direction. In this paper, we have presented two examples communicated in the scientific community:

- The Nebraska thunderstorm documented by the *University of Alaska* in August 1999 provides strong evidence of thunderstorm-triggered gravity waves propagating upwards into the mesosphere (detected by optical instruments measuring the spatial distribution of the OH nightglow at 85 km). However, the mesosphere is not identical to the ionosphere but little imagination is required to assume gravity waves travelling even higher than 85 kilometers.
- The statistical results of the GPS/MET experiment provides additional information indicating an impressive correlation between thunderstorm and gravity wave activity in the lower atmosphere on one hand and E region irregularities on the other hand. However, we have raised words of caution because that E region irregularities must not be considered similar to sporadic E events as discussed by VHF radio amateurs.

Unfortunately, radio amateurs have no instrumentation capable to detect the presence of gravity waves, therefore we need to deal with tracers as an alternative. Thunderstorm-triggered gravity waves are associated with strong updrafts (convectively generated gravity waves) causing charge separation within the thunderstorm cloud which results in cloud-to-cloud and cloud-to-ground lightning strikes, respectively. Each strike creates a *sferic*, i.e. an electromagnetic impulse of short duration which direction-finding radio receivers may detect quite easily. Thus, by analysing the geographical position of sferics we may localize the geographical position of thunderstorms more or less accurately. However, gravity waves travel in vertical and also in horizontal direction, i.e. the position of gravity waves penetrating the E region of ionosphere may differ considerably from thunderstorm positions. Thus, sferics may trace thunderstorm positions but can hardly predict the geographical position of sporadic E.

Nevertheless, in our project's early analyses we have compared sferic positions and sporadic E positions based on observations made during the 2004 sporadic E season in Europe. The sferic positions were derived from the *WetterOnline* internet service and the sporadic E positions were calculated from 144 MHz dx QSOs reported by radio amateurs. It was no surprise finding many examples of sporadic E not associated with any thunderstorm at all. In fact, we believe that, say less than ten percent or even less of mid-latitude sporadic E is triggered by thunderstorms, if any. It is important to note that previous researchers did not find any convincing correlation between thunderstorms and 144 MHz sporadic E propagation, i.e. all what we may expect is a small effect or, alternatively, no effect at all. However, we are surprised about one data example (June 27, 2004) which shows a geographical pattern of sporadic E activity almost identical to the geographical distribution of sferics.

Map presentations do not appear an appropriate tool for identifying possible correlations in the spatiotemporal distribution of sporadic E and sferic activity. Map displays can only consider short observation periods with few data points (too many data may overload the map display) and cannot reveal possible time delays between sferics and sporadic E events. We have therefore suggested an alternative approach which considers relative rather than absolute data, i.e. distances and time differences instead of geographical coordinates and UTC information. With this method even long-term observations may be plotted in only one diagram which will hopefully support future statistical analyses. However, we cannot access numerical sferic data required to calculate the distance between sporadic E and sferic events, i.e. our project currently faces practical complications which our team needs to address in the near future.

Considering the scientific material and, perhaps, our findings from June 27, 2004, the possibility of thunderstorm effects on 144 MHz sporadic E propagation cannot be generally excluded. On the other hand, it is much too early taking those effects for

granted at this stage of investigation. Also, this paper focuses on one particular model but alternative models are also worth to be investigated in more detail. GRAYER, for example, draws our attention to cumulonimbus generating “electric fields [which] are known to cause a drift of atmospheric electrons towards the E layer, charging it up to about 100-300 kV” [52]. He considers this “an equally interesting (and perhaps more persuasive) mechanisms for coupling between thunderstorms and Es” but this model hasn’t been considered by professionals so far [52].

Thus, thunderstorm effects on VHF sporadic E propagation remain an open issue in amateur radio propagation studies worth to be investigated in more detail. The authors hope that this paper may provide some new aspects and considerations and may stimulate ham cooperation in this fascinating subject which combines elements from meteorology (thunderstorms), ionospheric physics (sporadic E), VLF radio techniques (sferic detection), VHF radio operation (144 MHz dx QSOs), internet applications (weather services and dx alerting systems), software engineering (data acquisition and data processing) and data analysis methods.

*Acknowledgements:* The authors are grateful to all weather services having supported our studies. We are in particular grateful to the *WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH*, to the *Blitzinformationsdienst von Siemens (BLIDS)* and to the *Wetterzentrale Georg Müller* for granting permission of accessing their online data in our analyses. We thank G. GRAYER (G3NAQ) for reading the manuscript and for providing many valuable comments. We are also grateful to the many VHF radio amateurs having submitted their sporadic E observations to our web sites which has supported our studies considerably.

## 6 References

- [1] Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, Hines C. O.  
Can. J. Phys., 38, 1441-1481, 1960
- [2] Wellenausbreitung II, Grosskopf J.  
Bl Hochschultaschenbücher 539/539a, Mannheim, 1970
- [3] Atmospheric gravity waves generated in the high latitude ionosphere: a review, Hunsucker R. D.  
Rev. Geo. and Space Phys., 20, 293-315, 1982
- [4] Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights, Hines C. O.  
This week’s citation classics, 1985  
<http://www.garfield.library.upenn.edu/classics1985/A1985AKX9400001.pdf>
- [5] VHF and UHF propagation modes  
Grayer G., G3NAQ  
The VHF/UHF DX Book, White I., G3SEK (editor), p. 2.45-2.46, RSGB, 1995
- [6] Cometary origin of sporadic E  
Spokes G. N., Annual meeting of the Society of Amateur Radio Astronomers, 1996  
[http://users.erols.com/nspokes/paper\\_es.htm](http://users.erols.com/nspokes/paper_es.htm)
- [7] A study of atmospheric gravity waves and traveling ionospheric disturbances at equatorial latitudes, Balthazor R. L., Moffet R. J.  
Ann. Geophysicae 15, 1048-1056, 1997  
[http://194.94.42.12/licensed\\_materials/00585/papers/7015008/70151048.pdf](http://194.94.42.12/licensed_materials/00585/papers/7015008/70151048.pdf)
- [8] Wave-associated sporadic neutral layers in the upper atmosphere  
Clemesha B. R., Batista P. P., Simonich D. M.  
Rev. Bras. Geof., 15, no. 3, 1997  
[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0102-261X1997000300003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-261X1997000300003)
- [9] High-altitude atmospheric flashes (sprites and jets), Space Physics Textbook  
University of Oulu, 1998  
[www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/Welcome.html](http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/Welcome.html)  
[www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/sprites.html](http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/sprites.html)
- [10] Dist – find great-circle distance between two points on earth’s surface (Perl code), Kindred D., 1998, <http://indo.com/distance/dist.pl>
- [11] VHF & UHF propagation, “Predicting – be sure to do this daily”, Gyde R., ZL1NE/1, 1999
- [12] Personal communication  
Gyde R., ZL3NE/1, 2000
- [13] ST radar observations of atmospheric waves over mountainous areas: a review, Röttger J., Ann. Geophysicae 18, 750-765, 2000
- [14] Coupling, energetics and dynamics at atmospheric regions: CEDAR Phase III, Summary report, year unknown
- [15] Seasonal variations of gravity wave structures in OH airglow with a CCD imager at Shigaraki  
Nakamura T., Higashikawa A., Tsuda T., Matsushita Y., Earth Planets Space, 51, 897-906, 1999  
[http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/5107\\_08/51070897.pdf](http://www.terrapub.co.jp/journals/EPS/pdf/5107_08/51070897.pdf)
- [16] Atmospheric gravity wave signature in the infrared hydroxyl OH airglow  
Frey H. U., Mende S. B., Arens J. F.  
Geophys. Res. Lett., 27, 41-44, 2000  
[http://sprg.ssl.berkeley.edu/adminstuff/webpubs/2000\\_grl\\_41.pdf](http://sprg.ssl.berkeley.edu/adminstuff/webpubs/2000_grl_41.pdf)
- [17] Gravity wave spectra from GPS/MET occultation observations  
Steiner A. K., Kirchengast G.  
American Met. Soc., 495-503, 2000  
<http://www.uni-graz.at/igam-arsclisys/publications/publ2000/AKSandGK-JAOT-v17p495y2000.pdf>
- [18] Gravity waves and ionospheric irregularities over tropical convection zones observed by GPS/MET radio occultation, Hocke K., Tsuda T., Geophys. Res. Lett., 28, 2815-2818, 2001  
[http://www.cosmic.ucar.edu/related\\_papers/2001\\_hocke\\_gravity\\_waves.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/2001_hocke_gravity_waves.pdf)
- [19] Global sounding of sporadic E layers by the

- GPS/MET radio occultation experiment  
Hocke K., Igarashi K., Nakamura M., Wilkinson P., Wu J., Pavelyev A., Wickert J.  
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 63, 1973-1980, 2001  
[http://www.cosmic.ucar.edu/related\\_papers/2001\\_hocke\\_sporadic\\_e.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/related_papers/2001_hocke_sporadic_e.pdf)
- [20] Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere, Fritts D. C., Alexander M. J.  
<http://www.co-ra.com/dave/RG/RG03galleys.pdf>
- [21] Gravity waves, Najder, J., Azzolina M.,  
[http://vortex.weather.brockport.edu/~rochette/meso\\_presentations/Gravity\\_Waves.ppt](http://vortex.weather.brockport.edu/~rochette/meso_presentations/Gravity_Waves.ppt)
- [22] Gravity waves: what's the attraction  
Computer-aided forecasting exhibition  
Mc Noldy B.  
[www.mcwar.org/articles/cafe/gw/gravwaves.html](http://www.mcwar.org/articles/cafe/gw/gravwaves.html)
- [23] Buoyancy (gravity) waves in the atmosphere  
Hocking W. K., University of Western Ontario, Dep. of Physics and Astronomy  
[http://www.physics.uwo.ca/~whocking/p103/grav\\_wav.html](http://www.physics.uwo.ca/~whocking/p103/grav_wav.html)
- [24] Mid-latitude sporadic E – a review  
Hawk M., The AM and FM Dxer's resource, 2001  
<http://www.amfmdx.net/propagation/Es.html>
- [25] High resolution observations of sporadic-E layers within the polar cap ionosphere using a new incoherent scatter radar experiment  
Damtie B., Nygrén T., Lehtinen M. S., Huuskonen A., Ann. Geophysicae, 20, 1429-1438, 2002
- [26] News, comments & reports  
Kyriazis N., 5B4AZ, Dubus 3, p. 94-95, 2003
- [27] A study of stratospheric GW fluctuations and sporadic E at midlatitudes with focus on possible orographic effects of Andes, Hocke K., Tsuda T., de la Torre A., J. Geophys. Res., 107, D20, 4428, 2003, <http://www.agu.org/pubs/crossref/2002/2001JD001330.shtml>
- [28] Application of GPS occultation für studies of Atmospheric waves in the middle atmosphere and ionosphere, Tsuda T., Hocke K.  
Proceedings of the International Workshop on GPS Meteorology, Tokyo 2003  
[http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps\\_Met/gpsmet/CD-1\\_Proceedings\\_PDF/04\\_Paper\\_S2%5C2-02\\_Tsuda.pdf](http://dbx.cr.chiba-u.jp/Gps_Met/gpsmet/CD-1_Proceedings_PDF/04_Paper_S2%5C2-02_Tsuda.pdf)
- [29] Simultaneous observations of mesospheric gravity waves and sprites generated by a midwestern thunderstorm, Sentman D.D., Wescott E.M., Picard R.H., Winick J.R., Stenbaek-Nielsen H.C., Dewan E.M., Moudry D.R., Sao Sabbas F.S., Heavner M.J., J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 65, 537-550, 2003, [http://nis-www.lanl.gov/~heavner/publications/gravity\\_wave/gravity\\_waves\\_Rev2.html](http://nis-www.lanl.gov/~heavner/publications/gravity_wave/gravity_waves_Rev2.html)
- [30] On the spectrum of vertically propagating gravity waves generated by a transient heat source  
Alexander M. J., Holton J. R., Atmos. Chem. Phys. Discuss. 4, 1063-1090, 2004  
[http://www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/4/1063/acpd-4-1063\\_p.pdf](http://www.copernicus.org/EGU/acp/acpd/4/1063/acpd-4-1063_p.pdf)
- [31] Intrusive gravity currents and internal gravity wave generation in stratified fluid, Flynn M. R., Sutherland B. R., J. Fluid Mech., 2004  
<http://www.co-ra.com/dave/RG/RG03text.pdf>
- [32] Coordinating amateur observations in scientific research {1}, Email reflector service of the Propagation Studies Committee of the RSGB, Melia A., G3NYK, July 4, 2004
- [33] Coordinating amateur observations in scientific research {2}, Email reflector service of the Propagation Studies Committee of the RSGB  
Grayer G., G3NAQ, July 5, 2004
- [34] The generic mapping tools (GMT), version 4.0  
Wessel P, Smith W. H. F., 2004  
<http://gmt.soest.hawaii.edu/>
- [35] INSPIRE project, Green J. L., Goddard Space Flight Center, NASA  
<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/inspire/>  
<http://image.gsfc.nasa.gov/poetry/inspire/basic.html>
- [36] GPS/MET – Active Limb Sounding  
University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), <http://www.cosmic.ucar.edu/gpsmet/>
- [37] Analysis of gravity waves from radio occultation measurements, University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), Lange M., Jacobi Ch., Institut für Meteorologie, University Leipzig (year unknown)  
[www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/2002\\_LIM\\_4.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/2002_LIM_4.pdf)
- [38] Lightning & atmospheric electricity research at the Global Hydrology and Climate Center  
<http://thunder.msfc.nasa.gov/>  
<http://thunder.msfc.nasa.gov/data/query/distributions.html>
- [39] WetterOnline, Meteorologische Dienstleistungen GmbH, Bonn, <http://www.wetteronline.de>
- [40] Wetterzentrale Georg Müller, Bad Herrenalb  
<http://www.wetterzentrale.de>
- [41] BLIDS – Blitz-Informationdienst von Siemens, Siemens AG, Industrial Solutions and Services  
<https://www.blids.de/>
- [42] EUCLID, European Cooperation for Lightning Detection, <http://www.euclid.org/>
- [43] TORRO, Tornado and Storm Research Organisation, United Kingdom, <http://torro.org.uk>
- [44] Arrival Time Difference System (ATD), UK Met Office, Exeter,  
[www.metoffice.com/climate/uk/averages/lightning.html](http://www.metoffice.com/climate/uk/averages/lightning.html)
- [45] DX Summit, Dx cluster network  
<http://oh2aq.kolumbus.com/dxs/>
- [46] Aviation formulary v1.42, Ed William's aviation page, <http://williams.best.vwh.net/>
- [47] Amateur Radio Propagation Studies web site, Grassmann V., DF5AI, <http://www.df5ai.net>
- [48] Sporadic E and thunderstorms, Cremer S., DL1DBC, <http://www.dl1dbc.net/>
- [49] The 'World of DX above 50 MHz' web site, Langenohl U., DK5YA, <http://www.vhfdx.de>
- [50] The DXrobot web site, Munters A., PE1NWL, <http://www.gooddx.net>
- [51] The 'VHF DX' web site, Sampol G., EA6VQ  
<http://www.vhfdx.net>
- [52] Personal communication  
Grayer G., G3NAQ, 2004

# Gewittereinflüsse auf die Sporadisch-E Ausbreitung im 144 MHz Band

von **Volker Grassmann (DF5AI)**, **Sabine Cremer (DL1DBC)**, **Udo Langenohl (DK5YA)**,  
**Allard Munters (PE1NWL)**, **Gabriel Sampol (EA6VQ)**, **Joachim Kraft (DL8HCZ)**

Hinweis: Die angegebenen Abbildungs- und Literaturverweise beziehen sich auf die englischsprachige Version dieses Aufsatzes, die farbigen Abbildungen befinden sich auf den hinteren Umschlagseiten dieser Dubus-Ausgabe.

## 1 Einleitung

Können Gewitter sporadische E-Schichten und somit Weitverbindungen im UKW-Bereich hervorrufen? KYRIAZIS (5B4AZ) vertritt beispielsweise die Auffassung, dass Sporadisch-E Wolken nördlich von Griechenland mit Gewitterformationen über dem Balkan in einem engen Zusammenhang stehen [26]. Einige Funkamateure vermuten sogar einen generellen Zusammenhang zwischen dem Wetter und der Sporadisch-E Funkwellenausbreitung im 144 MHz Band. Beispielsweise bewertet GYDE (ZL3NE) jegliche Sporadisch-E Verbindungen im 144 MHz Band als eine Fehlinterpretation, d.h. er bezweifelt grundsätzlich alle Sporadisch-E QSOs in Australien und Neuseeland und erklärt diese Weitverbindungen durch troposphärische Funkwellenausbreitung [11], [12]. Viele Funkamateure bleiben jedoch skeptisch. GRAYER (G3NAQ) weist zum Beispiel darauf hin, dass bisher keine der behaupteten Zusammenhänge zwischen Gewitter- und Sporadisch-E Ereignissen auf wissenschaftlich glaubhafte Weise nachgewiesen werden konnten [5]. HAWK (*AM and FM Dxe's resource*) stellt fest, dass es sich bei Gewittereinflüssen auf Sporadisch-E um eine Theorie handelt, die sich „zu sterben weigert“ [24]. Tatsächlich kann bereits die Bereitschaft zur inhaltlichen Auseinandersetzung mit diesem Thema zu harschen Reaktionen führen - entweder von Fachspezialisten (siehe z.B. [32]), aber auch von Funkamateuren (siehe z.B. [33]).

Die Autoren dieses Aufsatzes waren gleichermaßen skeptisch und bezweifelten jeglichen Zusammenhang zwischen Gewitter und dem Auftreten von Sporadisch-E. Das Wetter und Gewitter einerseits und Sporadisch-E Ereignisse andererseits stellen in der Tat sehr unterschiedliche geophysikalische Phänomene dar, die -getrennt durch 90 bis 100 Höhenkilometer- in sehr unterschiedlichen Bereichen der Erdatmosphäre anzutreffen sind. Schließlich ist uns auch keine Studie bekannt, welche eine überzeugende Korrelation zwischen dem räumlichen und zeitlichen Auftreten von Gewittern und Sporadisch-E nachweisen könnte.

Im Frühjahr 2004 hatte einer der Autoren (DF5AI) ein Datenauswerteprojekt angeregt, welches Sporadisch-E Daten (d.h. DX Informationen von Funkamateuren) mit *Sferic*-Beobachtungen aus der Meteorologie (d.h. von Blitzentladungen hervorgerufene Funkimpulse) vergleichen sollte. Dieser Vorschlag war durch zweierlei Gründe motiviert: einerseits durch den leichten Zugang zu meteorologischen Daten und Funkausbreitungsberichten im Internet, womit eine Datenanalyse bequem gespeist werden könnte, und andererseits durch die Erwartung, dass mit dem Nachweis einer nicht vorhandenen Korrelation zwischen den Datensätzen eine abschließende Klärung der obigen Theorie herbeigeführt werden könnte. CREMER (DL1DBC) hat daraufhin unser Projektteam zusammengestellt, die erforderliche Softwareunterstützung verwirklicht und schließlich die notwendigen Genehmigungen eingeholt, um kommerzielle Wetterdaten für unsere Zwecke nutzbar zu machen.

Um die wichtigste Frage dieses Aufsatzes sogleich an dieser Stelle zu beantworten: wir haben in der Tat keine eindeutigen Beweise für Gewitterwirkungen auf Sporadisch-E gefunden, d.h. wir können –bezogen auf die Sporadisch-E Saison 2004- keine zweifelsfreie Korrelation zwischen 144 MHz DX QSOs und *Sferic*-Daten feststellen. Somit sind wir in die Lage versetzt, einen Beitrag zur endgültigen Niederwerfung der obigen Theorie zu leisten – wir werden es nicht tun! Damit wollen wir keineswegs zum Ausdruck bringen, dass wir die spekulativen Gewittereinflüsse auf die Sporadisch-E Ausbreitung als eine Realität ansehen, die nachzuweisen früher oder später einmal gelingen wird. Wir wurden auf Grund unserer Untersuchungen jedoch gezwungen, im Spektrum der Argumente und Meinungen, also in der Bandbreite zwischen *ja* und *nein* (letzteres war unsere Ausgangsposition), auch ein *vielleicht* ernsthaft in Erwägung zu ziehen. Nach unserer Auffassung kann die Angelegenheit nicht als abgeschlossen erklärt werden, ohne dass weitere Untersuchungen angestellt und wichtige Detailfragen beantwortet werden:

- Wissenschaftliche Quellen weisen darauf hin, dass Atmosphärenforscher die Möglichkeit von Gewittereinflüssen auf die Ionosphäre ernsthaft diskutieren (siehe Abschnitt 3.1).
- Das GPS/MET Experiment verweist auf eine beeindruckende statistische Korrelation zwischen Konvektionsprozessen in der unteren Atmosphäre und Elektronendichte-Irregularitäten in der ionosphärischen E-Schicht (siehe Kapitel 3.2).

- Messungen des OH Nachtleuchtens weisen zweifelsfrei nach, dass intensive Gewitterstürme Einfluss auf die Mesosphäre in 85 Kilometern Höhe nehmen können (siehe Abschnitt 3.3), weshalb vergleichbare Wirkungen auch auf die Ionosphäre nicht auszuschließen sind.
- Wir müssen vermuten, dass unsere bisherigen Analysemethoden der Problemstellung möglicherweise gar nicht angemessen sind, weshalb unsere Auswertungen eventuell nicht in die richtige Richtung weisen. Die festgestellte Nichtkorrelation der Daten kann daher noch nicht als endgültiges Ergebnis angesehen werden, denn weitere Analysemethoden müssen berücksichtigt werden – diese sind derzeit jedoch noch nicht für einen praktischen Einsatz vorbereitet (siehe Abschnitt 4.4).
- Schließlich haben wir in den Sporadisch-E und Sferic-Daten ein außergewöhnliches Ereignis identifiziert, welches weitere Untersuchungen angeraten erscheinen lässt (siehe Abschnitt 4.3).

Somit sehen wir uns momentan nicht in der Lage versetzt, aus dem bisherigen Stand der Untersuchungen ein endgültiges Ergebnis ableiten zu können (tatsächlich sind wir überrascht, dass manche Kommentatoren zu einem endgültigen Urteil bereits befähigt erscheinen). Dieser Aufsatz dokumentiert somit unser bisheriges Verständnis der Sachlage, adressiert offene Fragen und diskutiert Möglichkeiten zur Lösung des Rätsels. Gleichzeitig hoffen wir, interessierte Funkamateure zur Durchführung eigener Studien anregen zu können, weil wir in der vorliegenden Aufgabenstellung ein besonders faszinierendes Element aus der Welt der Amateurfunk-Ausbreitungsstudien erblicken.

## 2 Geophysikalische Hintergrundinformationen

### 2.1 Neutralteilchen, Ionen und Elektronen in der Ionosphäre

In der Ionosphäre sind weniger als ein Tausendstel der Atome und Moleküle ionisiert, d.h. die elektrisch neutralen Teilchen dominieren die chemische Zusammensetzung selbst in einer voll ausgeprägten E- oder F-Schicht. Zur Unterscheidung der neutralen und geladenen Teilchen verweisen Atmosphärenwissenschaftler auf das *Ionengas*, das *Elektronengas* und auf das *Neutralgas* (welche in der Summe als *ionosphärisches Plasma* bezeichnet werden). Das Ionengas besitzt dabei eine starke Kopplung zum Neutralgas, d.h. die Dynamik der Neutralteilchen (z.B. durch Hochatmosphärenwinde) überträgt sich durch Teilchenstöße auch auf das Ionengas, weil die Stoßprozesse eine Impuls- und Energieübertragung von den Neutralteilchen auf die Ionen bewirken. Die Elektronen sind andererseits durch elektrostatische Kräfte an die Ionen angebunden, d.h. das dynamische Verhalten der Ionen (welches durch die Neutralteilchen bestimmt wird) bildet sich gleichermaßen auch im Elektronengas ab. Dies erklärt übrigens die Wirkungsweise von ionosphärischen Radaranlagen, die, obwohl der Radarstreuprozess von den Elektronen getragen wird, auch die Dynamik der oberen Neutralgasatmosphäre erfahrbar machen.

Die geladenen Teilchen nehmen ferner die Wirkung von elektrostatischen Feldern in der Ionosphäre und die Wirkung des erdmagnetischen Feldes wahr, d.h. die Ionen- und Elektronenbewegung wird durch mechanische und elektromagnetische Kräfte gleichermaßen beeinflusst, was eine Vielzahl von physikalischen Effekten und Phänomenen zur Folge hat. In der ionosphärischen F-Schicht (200 bis 400 km Höhe) vermindert die fortgeschrittene Verdünnung der Atmosphärendichte die Häufigkeit von Teilchenstößen, weshalb die Ionenbewegung vornehmlich durch elektromagnetische Kräfte (die so genannte  $E \times B$  Drift) kontrolliert wird. In der E-Schicht ist die Atmosphärendichte jedoch vergleichsweise hoch<sup>1</sup>, weshalb die Ionenbewegung maßgeblich durch Teilchenstöße beeinflusst wird – was jedoch nicht in gleicher Weise für die viel kleineren Elektronen gilt, die weiterhin die Dominanz der elektromagnetischen Kräfte erfahren. Die Ionen- und Elektronendrift kann sich daher sowohl hinsichtlich des Geschwindigkeitsbetrages als auch im Hinblick auf die Bewegungsrichtung deutlich unterscheiden, was letztlich einer Ladungstrennung gleichkommt und zum Aufbau elektrostatischer Felder führt, womit erneut eine Vielzahl komplizierter Phänomene in der E-Schicht hervorgerufen werden können – beispielsweise *Plasmairregularitäten* und *Plasmainstabilitäten*, die Radiowellen auf sehr effektive Weise zurückstreuen können.

Unter Zuhilfenahme der obigen Begrifflichkeiten würde man Gewitterphänomene nun als Bestandteil der unteren Neutralgasatmosphäre einordnen (was zunächst eine offensichtliche Aussage darstellt, weil die Häufigkeit von Ionen und Elektronen in der unteren Atmosphäre vernachlässigt werden kann). Sporadische E-Schichten verkörpern jedoch ein Phänomen des Ionen- und Elektronengases in 100 bis 110 Kilometern Höhe (der Begriff Sporadisch-E steht synonym für kurzzeitige Erhöhungen der Ionen- und Elektronendichte innerhalb der E-Schicht). Im Hinblick auf die Möglichkeit von Gewitterwirkungen auf Sporadisch-E können

<sup>1</sup> Man beachte, dass Weltraumwissenschaftler die Höhe von 100 Kilometern als das Ende der Erdatmosphäre und als den Beginn des Welt-raums bezeichnen. Tatsächlich löst diese Festlegung Schmunzeln bei den Ionosphärenphysikern hervor, weil die Atmosphärendichte in dieser und auch in noch größeren Höhen immer noch beträchtlich ist. So findet man im Höhenintervall zwischen 100 und 500 Kilometern zahlreiche Phänomene vor (beispielsweise Winde und Gezeiten), die im Vakuum des Weltraums gar nicht existieren könnten. Auf Grund der hohen atmosphärischen Reibung sind Satelliten daher auch nicht befähigt, in einer Höhe von 100 km die Erde zu umkreisen.

wir daher die Existenz zweiter unabhängiger Mechanismen vermuten, d.h.:

- Ein vertikal gerichteter *Transportprozess*, der auf eine noch unbekannt Weise befähigt ist, die Wirkung eines Gewitters von der unteren in die obere Atmosphäre zu transferieren. Da es sich bei Gewittern um ein Phänomen des neutralen Atmosphärgases handelt, ist es naheliegend anzunehmen, dass die Gewitterwirkung auch in 100 km Höhe zunächst nur im Neutralgas in Erscheinung tritt. Der postulierte Transportprozess findet somit ausschließlich in der Neutralgasatmosphäre statt, weshalb die Bedeutung der Ionen und Elektronen an dieser Stelle vernachlässigt werden kann.
- Ein *Kopplungsprozess*, welcher die vom Gewitter hervorgerufenen Effekte im Neutralgas auf die Ionen und Elektronen zu übertragen in der Lage ist, damit die Ausbildung einer sporadischen E-Schicht möglich wird. Dieser Kopplungsprozess ist innerhalb der E-Schicht wirksam, weshalb großräumige Transportprozesse an dieser Stelle unberücksichtigt bleiben können (die lokale Bewegung der Neutralteilchen, der Ionen und Elektronen wird jedoch eine wichtige Bedeutung erlangen).

## 2.2 Die Windscherungs-Theorie

Sporadische E-Schichten weisen eine nicht unbedeutende Menge an langlebigen Metallionen auf (d.h.  $\text{Fe}^+$  und  $\text{Mg}^+$  neben den üblicherweise dominierenden Ionen  $\text{O}_2^+$  und  $\text{NO}^+$ ), die durch Windfelder innerhalb der E-Schicht transportiert werden können (beispielsweise durch Gezeitenbewegungen, die ähnlich wie in den Weltmeeren auch in der Atmosphäre angetroffen werden). Wie oben beschrieben ist die Bewegung der Metallionen durch Teilchenstöße an die Bewegung der Neutralteilchen gekoppelt. An konvergenten Nullstellen der Windgeschwindigkeit (siehe die gestrichelte Linie in **Abb. 2.1**) können sich die Ionen daher in einer ausgeprägten sporadischen E-Schicht akkumulieren (wobei die höhenabhängige Umkehr der Windrichtung jedoch nicht das einzige Windscherungs-Szenario darstellt, welches sporadische E-Schichten hervorrufen kann).

*Bildunterschrift zur Abb. 2.1: Erzeugung von sporadischen E-Schichten durch horizontale Windscherung mit Umkehr der Windrichtung (nördliche Breiten). Das Windfeld beschreibt die kollektive Bewegung der Neutralgasteilchen, die mit den positiv geladenen Ionen zusammenstoßen und dabei Impuls und Energie an die Ionen übertagen. Als Ladungsträger in einem Magnetfeld können sich die Ionen jedoch nur spiralförmig um die erdmagnetischen Feldlinien bewegen, was je nach aktueller Windrichtung entweder auf- oder abwärts entlang der erdmagnetischen Feldlinien erfolgt. Nimmt man eine Umkehrung der meridionalen Windgeschwindigkeit von Süd-Nord- in Nord-Süd-Richtung mit abnehmender Höhe an (Windscherung), dann können sich Ionen in einer sporadischen E Schicht ansammeln (gestrichelte Linie).*

Diese so genannte *Windscherungs-Theorie* (häufig auch der Originalbegriff *wind shear* verwendet) wurde von WHITEHEAD (1961), AXFORD (1963) und anderen entwickelt und wurde auch in zahlreichen Amateurfunkartikeln ausgeführt, siehe z.B. [5]. Da die vertikale Ionengeschwindigkeit proportional zur *Inklination* des erdmagnetischen Felds ist und diese in polaren Breiten hohe Werte annimmt, wird die Windscherungstheorie in polaren Regionen als weniger wirksam angesehen. Auch in der Nähe des magnetischen Äquators kann das Windscherungsmodell nicht wirksam werden, weil die horizontal verlaufenden Magnetfeldlinien keine vertikale Ionenbewegung in Gang setzen können. Das Modell erscheint daher nur in mittleren Breiten anwendbar<sup>2</sup> und wird als eine mögliche Ursache für die Entstehung von Sporadisch-E angesehen.

Mit diesem Modell besteht nun jedoch die Notwendigkeit, die Herkunft von metallischen Ionen<sup>3</sup> und von Windscherungen in der E-Schicht zu erklären. In diesem Dokument können die spezifischen Vorzüge und Schwierigkeiten der Windscherungstheorie jedoch nicht erörtert werden. Dennoch sei der Hinweis gegeben, dass auch die beschriebene Akkumulation von Ionen und Elektronen nicht zur Erklärung starker Streuechos auf hohen Radiofrequenzen ausreicht, d.h. weitere physikalische Zusammenhänge müssen zusätzlich zum Windscherungsmodell berücksichtigt werden (siehe die Diskussion weiter unten sowie ein weiteres Papier, welches auf der *Amateur Radio Propagation Studies* Internetseite erscheinen wird [47]).

Jedoch erfüllt das Windscherungsmodell die Bedingung des oben beschriebenen Kopplungsprozesses (siehe Abschnitt 2.1), denn als eine Eigenschaft der Neutralgasatmosphäre beeinflusst diese dennoch die Dichteverteilung der Ionen und Elektronen in der ionosphärischen E-Schicht. Die Dynamik der neutralen Teilchen erweist sich somit als ein bestimmendes Element bei der Erzeugung sporadischer E-Schichten.

Man beachte jedoch, dass das Windscherungsmodell nur ein Modell von vielen darstellt, die alle die Entstehung von Sporadisch-E zu erklären versuchen. Ein anderes Modell behandelt beispielsweise die vor circa zwanzig Jahren entdeckten *sporadic neutral layers*, d.h. Schichten mit einem gehäuften Auftreten von nichtionisiertem Natrium oder anderen chemischen Elementen. Diese „neutralen Schichten“ weisen Dicken zwischen einigen hundert Metern bis einige Kilometer auf und werden im gleichen Höhenniveau wie die Sporadisch-E Schichten aufgefunden [8]. Diese Schichten sollen unzweifelhaft mit Sporadisch-E in Verbindung

<sup>2</sup> Jüngste Untersuchungen scheinen die Anwendbarkeit des Modells auch in polaren Breiten zu bestätigen, siehe [25].

<sup>3</sup> Die Anwesenheit von metallischen Ionen in der E-Schicht wird beispielsweise auf einen von Meteoriten und Kometen hervorgerufenen Staubeintrag in die obere Atmosphäre gedeutet, siehe z.B. [6].

stehen, obwohl das Vorhandensein der einen Schicht nicht notwendigerweise das Vorhandensein der jeweils anderen zur Folge haben muss [8]. Die neutralen Schichten scheinen insbesondere auch mit atmosphärischen Wellenphänomenen in Verbindung zu stehen, welche in der Tat eine wichtige Rolle sowohl in der unteren wie auch in oberen Atmosphäre einnehmen.

## 2.3 Wellenphänomene in der Erdatmosphäre

Die leichte Kräuselung der Seeoberfläche, die sich am Strand brechenden Flutwellen, die die Weltmeere mit großer Geschwindigkeit durchziehenden Tsunamis oder langsam veränderlichen Oszillationen von globaler Ausdehnung (d.h. die Gezeiten) stellen allesamt Wellenphänomene in den Ozeanen dar. Man beachte, dass diese Wellen unterschiedliche Eigenschaften und Merkmale aufweisen, durch unterschiedliche Mechanismen ausgelöst werden, durch unterschiedliche Parameter und schließlich durch unterschiedliche mathematische Modelle beschrieben werden. Daher finden wir nicht einen stets identischen Wellentyp auf unterschiedlichen Skalenlängen vor, sondern Wellen mit spezifischen physikalischen Eigenschaften – in der Tat existiert eine große Vielfalt unterschiedlichster Wellenphänomene in den Ozeanen.

Die Erdatmosphäre wird oftmals auch *atmosphärischer Ozean* angesprochen, welcher jedoch zahlreiche Phänomene aufweist, die in den wirklichen Ozeanen freilich nicht vorgefunden werden können (wie beispielsweise die Ladungstrennung in der Ionosphäre), dennoch sind auch in der Erdatmosphäre eine Vielzahl unterschiedlicher Wellenphänomene gleichzeitig wirksam. Beispielsweise sind uns jene kurzwelligen Druckwellen geläufig, die sich in der Luft ausbreiten können, d.h. akustische Schallwellen, die zur Kategorie der *internen Wellen* zählen.

Ein weiteres Beispiel aus der Kategorie der internen Wellen sind die so genannten *atmosphärischen Schwerewellen*, welche als Oszillationen von Luftpaketen gedeutet werden können, die durch Auftriebskräfte einerseits angehoben und durch die Anziehungskraft der Erde andererseits zurückgelenkt werden.<sup>4</sup> Dieser Wellentypus wurde erstmals von HINES in einem richtungsweisenden Aufsatz im Jahre 1960 beschrieben [1] (siehe auch dessen persönlichen Anmerkungen in [4] sowie die einleitenden Erläuterungen beispielsweise in [22] und [23]). Seither wurden Schwerewellen von zahlreichen Forschergruppen sowohl experimentell als auch theoretisch eingehend untersucht, wodurch die bedeutende Rolle der Schwerewellen in der Atmosphärenphysik immer deutlicher zu Tage trat. Beispielsweise wurden die so genannten *travelling ionospheric disturbances* (TID) schließlich als die ionosphärische Manifestation von Schwerewellen in der Neutralgasatmosphäre verstanden, siehe z.B. [7].

Die Bezeichnungsweise unterscheidet großräumige Schwerewellen (*large scale gravity waves*) mit Schwingungsperioden zwischen dreißig Minuten und drei Stunden und Wellenlängen von einigen tausend Kilometern, die so genannten *medium scale gravity waves* mit Perioden zwischen circa fünfzehn Minuten und einer Stunde und einigen hundert Kilometern Wellenlänge, sowie den *small scale gravity waves* mit drei bis fünf Minuten Periodendauer [3]. Schwerewellen werden in verschiedenen Höhen und durch unterschiedliche Mechanismen ausgelöst, beispielsweise durch horizontale Luftströmungen, die auf Berghindernisse treffen und dabei die so genannten *Leewellen* auslösen (siehe **Abb. 2.2**), durch Konvektionsprozesse und Windscherungen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre, durch *Joule'sche Erwärmung* in der polaren Ionosphäre (hervorgerufen durch die Ausfällung von energiereichen Elektronen aus der Magnetosphäre in die Ionosphäre während geomagnetischer Störungen) und ebenso durch zahlreiche andere atmosphärische Phänomene.

*Bildunterschrift zu Abb. 2.2: Luftströmung über einen Bergrücken, welche auf der strömungsabgewandten Seite die Ausbildung von Leewellen hervorruft. Siehe [13] und die dort angegebenen Literaturquellen.*

## 2.4 Erzeugung von Schwerewellen durch atmosphärische Konvektion

Im Hinblick auf die in diesem Aufsatz behandelte Fragestellung erscheinen die durch Konvektion erzeugten Schwerewellen besonders beachtenswert. Heftige Gewitterstürme sind mit starken Konvektionsströmungen verbunden, welche Schwerewellen im gesamten Spektrum der möglichen Phasengeschwindigkeiten, Wellenfrequenzen und vertikalen und horizontalen Skalenlängen auslösen können. Dabei werden Luftpakete durch starke Auftriebskräfte aus ihrer Gleichgewichtslage ausgelenkt und zur Durchbrechung der Tropopause angetrieben, anschließend von der Schwerkraft jedoch wieder zurückgetrieben, was eine Schwingungsbewegung hervorruft, die mit einem im Meer auf und ab schwingenden Bojenkörper vergleichbar ist, siehe z.B. [21] und [23]. Bei genauerer Betrachtung muss die horizontale Schichtung der Atmosphäre bei der Beschreibung der Schwerewellenentstehung und -ausbreitung berücksichtigt werden, was zu komplizierten Zusammenhängen an der Grenzfläche zwischen der horizontal stark geschichteten Stratosphäre und der schwach geschichteten (weil durchmischten) Troposphäre führt, siehe **Abb. 2.3**.

---

<sup>4</sup> Der deutsche Begriff *Schwerewelle* ist weit weniger verhänglich wie der englische Begriff *gravity wave*, welcher oftmals mit ALBERT EINSTEINS Gravitationswellen (*gravitational waves*) in Verwechslung gerät. Die Namensgebung dieser Atmosphärenwellen resultiert aus der besonderen Bedeutung der Erdanziehungskraft bei der mathematischen Behandlung dieses Wellentyps.

**Bildunterschrift zu Abb. 2.3:** Erzeugung von Schwerewellen an der Grenzfläche zwischen der horizontal geschichteten Stratosphäre und der schwach geschichteten Troposphäre im Einflussbereich einer großen Amboßwolke, aus [31].

Schwerewellen können auch durch einzelne *Cumulonimbus* (Gewitterwolken) ausgelöst werden, welche als vorübergehende Wärmequellen von 10 bis 30 Minuten Dauer wirken können [30]. Die so erzeugten Schwerewellen besitzen ein breites Frequenzspektrum, wobei die hochfrequenten Komponenten mit großen vertikalen Gruppengeschwindigkeiten in Verbindung stehen, beobachtet wird diese Komponente jedoch nur kurzzeitig und auch nur in vergleichsweise geringer Entfernung zur Konvektionszelle. Bei längeren Beobachtungszeiten und bei größerer Entfernung zur Wärmequelle zeigen die Schwerewellen dann vergleichsweise kurze vertikale Wellenlängen mit geringen Gruppengeschwindigkeiten. Somit sind diese Wellenkomponenten zwar leichter zu beobachten, ihr Beitrag zur Impulsübertragung in die höhere Atmosphäre ist jedoch geringer als bei den einleitend erwähnten hochfrequenten Wellenkomponenten [30].

Im Hinblick auf die hier behandelte Aufgabenstellung können Schwerewellen als der im Abschnitt 2.1 postulierte Transportprozess interpretiert werden, welcher die Möglichkeit von Gewittereinflüssen auf die Ionosphäre erklären soll. Tatsächlich können hochaktive Gewitterzellen durch Konvektionsprozesse Schwerewellen erzeugen, die sich von der unteren Atmosphäre bis in Höhen von mindestens 85 Kilometern ausbreiten, siehe Abschnitt 3.2 und 3.3.

## 2.5 Sferics und die globale Gewitteraktivität

Blitzentladungen sind die Hauptquelle atmosphärischer Störungen im Radiobereich. Im globalen Maßstab finden circa 1000 bis 2000 gleichzeitige Gewitter statt, die in jeder Sekunde etwa 20 bis 100 Blitze auslösen [2]. Jede Blitzentladung erzeugt einen Radioimpuls (einen so genannten *Sferic*) von 100 Mikrosekunden bis 1 Millisekunde Dauer ( $t_0$ ). Das entsprechende Radiospektrum ist unterhalb der Frequenz  $f = 1/t_0$  nahezu konstant, bei höheren Frequenzen fällt das Signal mit  $1/f$  ab [2].

Eine nützliche Einführung in die Beobachtung atmosphärischer Phänomene im Langwellen-Radiobereich wird beispielsweise vom NASA Projekt *INSPIRE* gegeben [35], welches interessierten Anwendern auch Softwarelösungen zur Datenaufzeichnung, Filterung und Spektralanalyse zur Verfügung stellt. Durch die Triangulation der *Sferic*-Richtungen mittels entsprechender Langwellenempfänger mit Peileinrichtung können die geografischen Positionen der zugehörigen Blitzeinschläge mit einiger Genauigkeit ermittelt werden. Messungen dieser Art werden zum Beispiel von Versicherungsgesellschaften, Meteorologen und Geophysikern ausgewertet.

**Bildunterschrift zu Abb. 2.4:** Audiospektrum (Null bis 10 kHz) von tieffrequenten Radioimpulsen, die auf Blitzentladungen (*Sferics*) zurückzuführen sind. Jede der vertikalen Linien beschreibt einen Gewitterblitz im Umkreis von einigen hundert bis eintausend Kilometern zum Radioempfänger. Nach [35].

Die **Abb. 2.5 bis 2.8** zeigen die Gewitteraktivität in tropischen Breiten während des Jahres 2003. Die Tropen sind im hier diskutierten Zusammenhang besonders wichtig, weil ausgeprägte Konvektionsprozesse und heftige Gewitterstürme eben in diesen geografischen Regionen besonders häufig anzutreffen sind. Man beachte, dass der Gürtel der maximalen Gewitteraktivität gemäß dem jährlichen Sonnenverlauf um den Äquator oszilliert, was beispielsweise durch einen Vergleich der Gewitter im Westen der USA und China mit den Verhältnissen im südlichen Brasilien und Argentinien deutlich wird.

**Bildunterschrift zu Abb. 2.5:** Globale Gewitteraktivität im Frühjahr 1003 [38].

**Bildunterschrift zu Abb. 2.6:** Globale Gewitteraktivität im Sommer 1003 [38].

**Bildunterschrift zu Abb. 2.7:** Globale Gewitteraktivität im Herbst 1003 [38].

**Bildunterschrift zu Abb. 2.8:** Globale Gewitteraktivität im Winter 1003 [38].

## 2.6 Jahreszeitliche und breitenabhängige Schwankungen von Sporadisch-E

Im Abschnitt 3.2 wird das GPS/MET Experiment diskutiert, mit welchem Schichtstrukturen in der oberen Atmosphäre mit circa 100 Kilometern horizontaler und einigen hundert Metern vertikaler Ausdehnung beobachtet werden können [19]. Das Experiment liefert daher Informationen über die vertikale Struktur von sporadischen E-Schichten und deren saisonale Variabilität. Die **Abb. 2.9 bis 2.11** zeigen die vertikale Verteilung von Elektronendichte-Irregularitäten, die als Maß für das Auftreten von Sporadisch-E gedeutet werden.

**Bildunterschrift zu Abb. 2.9:** Sporadisch-E Verteilung zwischen dem 19.06. und 10.07.1995 [19].

**Bildunterschrift zu Abb. 2.10:** Sporadisch-E Verteilung zwischen dem 10.10. und 25.10.1995 [19].

**Bildunterschrift zu Abb. 2.11:** Sporadisch-E Verteilung zwischen dem 02.02. und 16.02.1997 [19].

**Abb. 2.9** zeigt Daten vom Juni/Juli 1995 mit einem Band hoher Sporadisch-E Aktivität zwischen 30° südlicher und 60° nördlicher Breite. Die Sporadisch-E Höhe variiert zwischen circa 95 und 105 Kilometer und zeigt zudem einige Zwischenschichten, die um

circa 6 km in vertikaler Richtung separiert sind und am besten zwischen 0° und 30° nördlicher Breite auf der Abbildung erkannt werden können. HOCKE et al. [19] deutet diese Zwischenschichten als Manifestation der vertikalen Wellenlänge jener Atmosphärenwellen, die für diese Schichten verantwortlich zeichnen. Man beachte auch die Schichten in hohen geografischen Breiten, die als so genannte Sommerechos in der polaren Mesosphäre (*polar mesospheric summer echoes*) gedeutet werden [19]. Ein Vergleich der **Abb. 2.9** (Juni/Juli) mit **Abb. 2.10** (Oktober) und **Abb. 2.11** (Februar) verdeutlicht die Verschiebung des Sporadisch-E Gürtels von nördlichen in südliche Breiten im Jahresverlauf, was an die oben erwähnte Breitenabhängigkeit der Gewitteraktivität erinnert.

### 3 Entwicklung eines möglichen Modells

#### 3.1 Zusammenführen der Detailergebnisse

Die obigen Ausführungen und Einzelbetrachtungen können zu einem Modell über Gewittereinflüsse auf die Sporadisch-E Entstehung zusammengeführt werden. Das nachfolgende Modell wurde in der wissenschaftlichen Literatur diskutiert (leider konnten wir die Originalquelle nicht ausfindig machen) und auch in Amateurfunkartikeln behandelt, siehe z.B. [5]. **Abb. 3.1** versucht die Zusammenhänge zwischen der Sporadisch-E Aktivität in der Ionosphäre und dynamischen Prozessen in der unteren Atmosphäre zu verdeutlichen.

*Bildunterschrift zu Abb. 3.1: Schematische Darstellung zum möglichen Zusammenhang zwischen dynamischen Prozessen in der unteren Atmosphäre und der Entstehung von Sporadisch-E.*

Heftige Konvektionsströme können die Grenzregion zwischen der Troposphäre und Stratosphäre (Tropopause) durchbrechen und auf diese Weise jenen Typ von Schwerewellen auslösen, dem unser besonderes Interesse gilt, d.h. die konvektiv erzeugten Schwerewellen. Jene Schwerewellen können sich von der Stratosphäre bis in die Mesosphäre ausbreiten und können sogar die ionosphäre E-Schicht in 100 km Höhe erreichen (ersteres wird durch Beobachtungen bestätigt, siehe Abschnitt 3.3, letzteres scheint durch statistische Untersuchungen belegt zu werden, siehe Abschnitt 3.2). Betrachtet man die Schwerewellen als eine oszillatorische Störung des Windfeldes in der oberen Atmosphäre, dann können hieraus jene Windscherungen entstehen, die als möglicher Entstehungsmechanismus von Sporadisch-E bereits diskutiert wurden. Das vorliegende Modell stellt somit einen Zusammenhang zwischen Schwerewellen (die in der unteren Atmosphäre entstehen und sich sodann bis in die obere Atmosphäre ausbreiten) und Sporadisch-E her.

Viele Wissenschaftler betrachten das beschriebene Szenario als ein plausibles Modell, nach unserer Einschätzung gilt es jedoch noch nicht in jeder Hinsicht als abgesichert. Dies erscheint nicht überraschend, denn die Untersuchung von Gewittereinflüssen auf die Ionosphäre macht eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Meteorologen und Ionosphärenphysikern erforderlich, welche in der Vergangenheit nicht praktiziert wurde. In der Tat scheinen beide Disziplinen wenig Gemeinsamkeiten zu besitzen, jedoch hat sich diese Sichtweise in den vergangenen Jahr deutlich verändert. So versuchen die meteorologischen Modellrechnungen (welche sich ursprünglich nur auf die Troposphäre konzentrierten) nunmehr auch die Bedeutung der mittleren Atmosphäre zu berücksichtigen, d.h. die Meteorologen sind zunehmend daran interessiert, die atmosphärischen Prozesse auch oberhalb der Troposphäre zu verstehen. Die Ionosphärenforschung hat ihre fachliche Bandbreite ebenso auf erhebliche Weise erweitert, indem mesosphärische aber auch magnetosphärische Einflüsse auf die Ionosphäre weitgehende Beachtung finden. Viele Wissenschaftler haben daher den Begriff der *Ionosphärenforschung* durch *Hochatmosphärenforschung* ersetzt, um die verallgemeinerte Sichtweise auch sprachlich zum Ausdruck bringen zu können.

In den folgenden Abschnitten werden Beispiele aus der wissenschaftlichen Literatur diskutiert, die das oben skizzierte Modell zu unterstützen scheinen, d.h. die GPS/MET Experimente und die optische Beobachtung von Schwerewellen während eines heftigen Gewittersturms. In Abschnitt 3.4 werden wir schließlich den prinzipiellen Unterschied zwischen den wissenschaftlichen Untersuchungen und unseren Amateurfunkstudien beleuchten.

#### 3.2 Beispiel 1: E-Schicht Irregularitäten über tropischen Konvektionszonen

##### 3.2.1 Das GPS/MET Experiment

Ähnlich wie in der Radioastronomie, wo man durch entsprechende „Bedeckungsexperimente“ planetare Atmosphären zu untersuchen beabsichtigt, nutzt das GPS/MET Programm die 24 Satelliten des *Global Positioning System* (GPS) zur Fernerkundung der Erdatmosphäre. Dabei beobachtet ein Satellit von einer tiefen Umlaufbahn aus, einem so genannten *Low Earth Orbit* (LEO), das Verschwinden und Auftauchen der GPS-Satelliten hinter dem Erdkörper. In Verlauf der Bedeckung eines GPS-Satelliten durch die Erde empfängt der LEO-Satellit somit Funksignale, die an der Peripherie des Erdkörpers tangential zur Erdoberfläche

verlaufen und auf diese Weise eine kurzzeitige „Durchleuchtung“ der Atmosphäre auf den GPS-Frequenzen 1575.42 MHz und 1227.6 MHz ermöglichen. Aus der Sicht des LEO-Satelliten erfolgen täglich circa 500 solcher Bedeckungen, woraus Informationen über die vertikale Schichtung der Erdatmosphäre in verschiedenen geografischen Bereichen abgeleitet werden können (weiterführende Einzelheiten zu diesem wissenschaftlichen Programm können auf der GPS/MET Internetseite [36] abgerufen werden).

### 3.2.2 Analyse der „Prime-Time“ Daten vom Februar 1997

HOCKE und TSUDA [18] haben die während der Meßkampagne im Februar 1997 gewonnenen Daten untersucht und dabei besonderes Augenmerk auf die Atmosphäre in tropischen Breiten gelegt. Zur Unterstützung optimaler Auswertungsergebnisse wurde während dieser so genannten *Prime-Time* Periode das GPS-eigene Kodierungsverfahren (Anti-Spoofing) deaktiviert. Die Ergebnisse werden im hier diskutierten Zusammenhang als bedeutsam bewertet, denn in den tropischen Bereichen bewirkt die intensive Sonneneinstrahlung ausgeprägte Konvektionsprozesse mit heftigen Gewittern, welche zahlreiche atmosphärische Wellenatmosphäre wie beispielsweise Schwerewellen auslösen, die sodann ihre Energie und ihren Impuls von der unteren in die obere Atmosphäre transportieren [28].

*Bildunterschrift zu Abb. 3.2: Darstellung verschiedener Parameter der tropischen Atmosphäre in Abhängigkeit von der geografischen Länge, aufgezeichnet während der GPS/MET Prime-Time Kampagne im Februar 1997, nach [18]. Siehe Text für weitere Einzelheiten.*

**Abb. 3.2** zeigt die über zehn Tage zusammengefassten Ergebnisse zwischen 5° und 25° südlicher Breite als Funktion der geografischen Länge. Das untere Diagramm (e) zeigt dabei die Anzahl der ausgewerteten Bedeckungsereignisse. Diagramm d liefert Informationen zur Topographie der Erdoberfläche in den untersuchten Regionen, die schwarzen Maxima symbolisieren dabei die Gebirgszüge in Brasilien (80° West), Afrika (40° Ost) und Indonesien (120° Ost). Kurve c beschreibt den mittleren troposphärischen Wasserdampfdruck in 4 bis 6 km Höhe. Hohe Wasserdampfkonzentration in der oberen Troposphäre gilt als Indikator für erhöhte Konvektion, das Diagramm c vermittelt somit einen Hinweis auf intensivierete Konvektionsprozesse und erhöhte Schwerewellenaktivität in den Tropen. Die relativen Temperaturschwankungen  $(\Delta T/\bar{T})^2$  in der Stratosphäre sind durch das Diagramm b dargestellt, wobei die durchgezogene Linie das Höhenintervall 32 bis 38 km und die gestrichelte Kurve das Intervall 22 bis 28 km beschreibt. Diese Kurven gelten als Indikator für die Modulation des Temperaturhintergrunds durch verstärkte Schwerewellenaktivität. Schließlich zeigt das Diagramm a die jeweiligen Maximalwerte von kleinräumigen Elektronendichte-Irregularitäten (vertikale Skalenlänge kleiner 7 km) zwischen 80 und 120 km Höhe.

Die Ergebnisse vermitteln eine beeindruckende Korrelation zwischen E-Schicht Irregularitäten und dynamischen Vorgängen in der unteren Atmosphäre. Der hohe Korrelationsgrad zwischen den Kurven wird durch erhöhte Schwerewellenaktivität in der unteren Stratosphäre gedeutet (22-28 km, siehe die durchgezogene Linie im Diagramm b), die durch ausgeprägte Konvektionsvorgänge in der tropischen Troposphäre ausgelöst wird (4-6 km, siehe Diagramm c). Die Korrelation zwischen der Schwerewellenaktivität (Diagramm b) und den E-Schicht Irregularitäten (a) wird interpretiert durch Verdichtungen in der Elektronenverteilung auf Grund von Windscherungen, Schwerewellen und geomagnetischer Effekte [28].

Betrachtet man die durchgezogene Kurve im Diagramm b, so stellt man jedoch eine vergleichsweise geringe Schwerewellenaktivität im Höhenintervall 32 bis 38 km fest, zudem erscheint der Kurvenverlauf nur eine geringe Übereinstimmung mit den anderen Parametern anzuzeigen. Andere GPS/MET Daten zeigen ähnliche Zusammenhänge, beispielsweise in den mittleren Breiten der nördlichen Hemisphäre, wo man ebenfalls eine hohe Schwerewellenaktivität in circa 25 km Höhe feststellte, jedoch eine geringe im darüber liegenden Intervall um 35 km [27]. In [18] werden solche Merkmale als Hinweis auf Schwerewellen gedeutet, die ihren Ursprung nicht in der Stratosphäre sondern in der Troposphäre finden. Aus unserer Sicht erwächst hieraus eine wichtige Fragestellung: deutet man das Auftreten von Sporadisch-E durch Schwerewellen, die sich von der oberen Troposphäre (bzw. unteren Stratosphäre) in die ionosphärische E-Schicht ausbreiten, so erwarten wir den Nachweis dieser Schwerewellen auch in allen Zwischenhöhen – was die vorliegenden Daten jedoch nicht zu bestätigen scheinen: die gezeigten E-Schicht Irregularitäten korrelieren zwar mit der Schwerewellenaktivität in 25 km Höhe, nicht jedoch mit der Schwerewellenaktivität in 35 km Höhe, was aus unserer Sicht schwer zu verstehen ist (im Abschnitt 3.2.5 werden weitere offene Fragen bei der Interpretation der GPS/MET Daten diskutiert). Die GPS/MET Daten dokumentieren jedoch auch Beispiele, die den erwarteten Verlauf bestätigen, d.h. E-Schicht Irregularitäten, die mit der Schwerewellenaktivität in der unteren und oberen Stratosphäre gleichzeitig korrelieren (siehe z.B. Abb. 7 in [28]).

### 3.2.3 Orographische Effekte

Die GPS/MET Auswertungen verweisen auf ein weiteres wichtiges Merkmal, nämlich die Entstehung von Sporadisch-E im Zusammenhang mit orographischen Hindernissen wie zum Beispiel hohe Gebirgsketten, die sich den Luftströmungen in der unteren Atmosphäre entgegenstellen. Die Schwerewellenverteilung (siehe Diagramm b in **Abb. 3.2**) zeigt insbesondere Maxima, die mit der Lage der im Diagramm d gezeigten Berge übereinstimmen (siehe auch Abb. 7 in [28]). Die vorliegenden Wellen werden dabei durch die Wechselwirkung zwischen Oberflächenwinden und orographischen Hindernissen gedeutet [27]. Die hier nicht

gezeigten Auswertungen in [27] deuten jedoch auch auf eine signifikante Schwerewellenaktivität über dem Atlantischen Ozean und Eurasien hin, die offenbar nicht durch orographische Effekte gedeutet werden können (siehe auch die Diskussion im Abschnitt 3.2.5).

Funkamateure haben ebenfalls die geographische Korrelation zwischen Sporadisch-E und hohen Gebirgszügen diskutiert, waren jedoch gezwungen anzuerkennen, dass orographische Effekte die Sporadisch-E Verteilung in Europa nicht erklären können, siehe z.B. [5]. GRAYER (G3NAQ) betrachtet daher der Einfluss von Gebirgen auf die Entstehung von Sporadisch-E –wenn ein solcher tatsächlich existieren sollte- als offensichtlich sehr klein [5]. Die GPS/MET Daten und Amateurfunkbeobachtungen vermitteln somit ein gleichermaßen inkonsistentes Bild, d.h. Beispielen, die einen Zusammenhang zwischen hohen Gebirgen und Sporadisch-E anzudeuten scheinen, stehen Gegenbeispiele gegenüber, die dem vermuteten Zusammenhang widersprechen.

### 3.2.4 Geografische Verteilung von Irregularitäten in der E-Schicht

**Abb. 3.3** zeigt eine Zusammenfassung der im GPS/MET Experiment im Jahre 1995 und 1997 gefundenen Elektronendichte-Irregularitäten in der unteren Ionosphäre (vergleiche mit **Abb. 2.9 bis 2.11**), man beachte insbesondere die Beobachtungen über dem südlichen Spanien und Nordwest-Afrika. Leider sind hier keine Daten mit Parametern ähnlich zu **Abb. 3.2** vorhanden, d.h. wir können die gezeigte Sporadisch-E Aktivität weder mit Wasserdampfdaten in der Troposphäre noch mit dem Temperaturfeld in der Stratosphäre vergleichen.

***Bildunterschrift zu Abb. 3.3:** Elektronendichte-Irregularitäten nach GPS/MET Daten [28]. Jede Markierung kennzeichnet ein Bedeckungsereignis, wobei der Radius die entsprechende Elektronendichteerhöhung in 105-110 km Höhe symbolisiert. Die roten Punkte kennzeichnen Daten vom Juni/Juli 1995, die grünen Punkte aus Oktober 1995 und die blauen Punkte aus dem Februar 1997. Das graue Band fasst die Daten zusammen, die scheinbar Grundlage von Abb. 3.2 sind. Siehe auch die farbige Version dieser Graphik auf den Umschlagseiten.*

### 3.2.5 Bemerkungen

Die in **Abb. 3.2** gezeigten Daten entsprechen scheinbar den blauen Datenpunkten innerhalb des grauen Bandes in **Abb. 3.3**, denn beide Abbildungen beziehen sich auf die Prime-Time Meßkampagne im Februar 1997. Offenbar dürfen wir daher die Daten innerhalb des grauen Bandes in **Abb. 3.3** mit den in **Abb. 3.2** gezeigten Ergebnissen vergleichen. Jedoch trifft man sodann auf einige Fragestellungen, die wir momentan nicht beantworten können:

- So würden wir beispielsweise erwarten, dass die **Abb. 3.2** und **3.3** vollständige Übereinstimmung hinsichtlich der longitudinalen Verteilung der Elektronendichte-Irregularitäten zeigen, also zwischen den Maxima der Größe  $\max(\Delta n_e)$  im Abschnitt a der **Abb. 3.2** und der horizontalen Streuung und dem Radius der blauen Datenpunkte innerhalb des grauen Bandes in **Abb. 3.3**. Eine solche Übereinstimmung ist für uns jedoch nicht erkennbar.
- Eine ähnliche Feststellung müssen wir beim Vergleich der orografischen Merkmale treffen, d.h. die Ergebnisse im Abschnitt d der **Abb. 3.2** scheinen keine Entsprechung in **Abb. 3.3** zu finden – die dortigen blauen Datenpunkte scheinen nicht mit geografischen Regionen zu korrespondieren, in denen bekannter Weise hohe Gebirgszüge angetroffen werden können.
- Gemäß **Abb. 3.3** wurden die ausgeprägtesten Elektronendichte-Irregularitäten an der Südspitze Südamerikas gefunden, im Gegensatz zur **Abb. 3.2** (Diagramm d) deutet dies nicht auf eine besondere Wichtigkeit hoher Gebirge (beispielsweise der Anden) hin. Nach unserer Einschätzung entspricht die Häufung der Datenpunkte um Feuerland (50° südliche Breite) einfach der saisonalen Sporadisch-E Häufigkeit auf der südlichen Halbkugel im Februar.
- In der Tat scheinen alle Datenpunkte in **Abb. 3.3** der bekannten breitenabhängigen und jahreszeitlich bedingten Sporadisch-E Verteilung zu entsprechen. Nach unserer Auffassung scheint diese keinen Hinweis auf eine besondere Sporadisch-E Häufung in den Tropen anzuzeigen, was mit den Ergebnissen in **Abb. 3.2** im Widerspruch zu stehen scheint.

So ist zur Vermeidung unzutreffender Schlußfolgerungen Vorsicht geboten, zumindest fällt es uns momentan schwer, die **Abb. 3.2** und **3.3** im Zusammenhang zu verstehen. Troposphärische Konvektion und damit in Verbindung stehende Schwerewellen spielen nach unserer Auffassung eine wichtige Rolle bei der Entstehung von Sporadisch-E (was durch die beeindruckenden Ergebnisse in **Abb. 3.2** unterstützt wird), auf der anderen Seite zögern wir, alle Sporadisch-E Ereignisse auf eben diese Weise zu interpretieren, weil alternative Mechanismen und Prozesse ebenfalls Berücksichtigung finden müssen (was nach unserer Auffassung durch **Abb. 3.3** bestätigt wird).

Auch gilt es darauf hinzuweisen, dass in [18] der Begriff *Sporadisch-E* mit *Elektronendichte-Irregularitäten* wechselseitig gleichgesetzt wird, wir bezweifeln jedoch, dass die Größe  $\max(\Delta n_e)$  tatsächlich ein direktes Maß für die von 144 MHz Funkamateuren beschriebene Sporadisch-E Aktivität darstellen kann. Man beachte, dass die maximale Amplitude von  $\max(\Delta n_e)$  kleiner

als  $80 \cdot 10^9 \text{ m}^{-3}$  ist (siehe Diagramm a in **Abb. 3.2**), was gerade einem Zehntel der Elektronendichte in einer voll ausgeprägten sporadischen E-Schicht entspricht und damit zur Erklärung von Sporadisch-E Überreichweiten im UKW-Bereich deutlich zu gering ausfällt. In [19] wird der Begriff Sporadisch-E sodann auch erklärt als „Namenskonvention der Wissenschaftsgemeinde, die nicht zu den dünnen Ionisationsschichten paßt, die in der D-, E- und F1-Schicht beobachtet werden“ – womit angedeutet ist, dass der Begriff Sporadisch-E unterschiedliche Bedeutungen besitzt, je nachdem ob er bei GPS/MET Daten oder im Amateurfunk verwendet wird.

Wir haben auch den Eindruck gewonnen, dass die Analyse und Interpretation der GPS/MET Ergebnisse noch von dynamischer Fortentwicklung und weiteren Verbesserungsmöglichkeiten geprägt ist (siehe z.B. [37]). Dennoch ist das besondere Potenzial der Radiobedeckungsexperimente allgemein anerkannt, nicht nur zur Verbesserung unseres Verständnisses vom Wetter und Klima, sondern auch beim Studium von atmosphärischen Wellenphänomenen und –prozessen, die auf die obere Atmosphäre Einfluss nehmen. Im Hinblick auf die hier vorliegende Untersuchung bedeutet dies: wir betrachten die GPS/MET Daten nicht als Beweis für Gewittereinflüsse auf die Erzeugung von Sporadisch-E, aber als einen wertvollen Hinweis, welcher weitere Untersuchungen begründet erscheinen läßt.

### 3.3 Beispiel 2: Erzeugung von „Sprites“ und Schwerewellen durch Gewitter

In etwa 85 Kilometern Höhe befindet sich die Schicht des OH-Nachtleuchtens, welche in der nächtlichen Mesosphäre durch schwingungsangeregtes Hydroxyl (OH) hervorgerufen wird, das auf chemoluminizente Reaktionen zwischen Sauerstoff- und Wasserstoffmolekülen zurückzuführen ist [29]. Schwerewellen können das infrarote Nachtleuchten modulieren, was sich in einer Welligkeit der Leuchtdichte bemerkbar macht. Mit geeigneten CCD-Kameras (siehe z.B. [15] und [16]) kann somit die Anwesenheit von Schwerewellen auch mit optischen Mitteln festgestellt werden. In diesem Abschnitt wird ein spektakulär zu nennendes Ereignis beschrieben, welches von der *Universität von Alaska* während eines heftigen Gewittersturms am 18. August 1999 über Nebraska dokumentiert wurde.

Im Rahmen einer wissenschaftlichen Meßkampagne führten SENTMAN et al. Beobachtungen des OH-Nachtleuchtens von einem Feuerbeobachtungsturm des *U.S. Forest Service* auf dem Bear Mountain in Süddakota durch. In jener Nacht bewegte sich ein heftiger Gewittersturm aus der südlichen Zentralregion von Nebraska in Richtung östliches Nebraska/Iowa, wobei die Bewegungsrichtung des Gewittersturms senkrecht zur Beobachtungsrichtung des Messteams erfolgte. **Abb. 3.4** zeigt eines der CCD-Bilder mit der nächtlichen Beleuchtung der Stadt Custer am unteren Bildrand (man beachte auch die Beleuchtung des *Crazy Horse Monuments* in der unteren linken Bildecke). Das Teilbild zeigt dabei die vergrößerte Ansicht eines so genannten *Sprites*, also eines der erst vor wenigen Jahren entdeckten Blitzentladungen, die sich von der unteren Atmosphäre bis in eine Höhe von 50 bis 90 Kilometern erstrecken (siehe z.B. [9] und die dort angegebenen Literaturhinweise). Im zentralen Bildbereich erkennt man das OH Nachtleuchten als eine elliptische Dunstschicht, deren Leuchtverteilung eine auf eine Schwerewelle zurückzuführende Welligkeit aufweist. Die detaillierte Untersuchung der vollständigen Videoaufnahme konnte die Bewegungsrichtung dieser elliptischen Strukturen rekonstruieren, die von einem klar erkennbaren Zentrum nach aussenweisend erfolgte [29]. Nach Übertragung der Strukturen auf eine Landkarte und durch Ergebnisvergleich mit entsprechenden Wetterkarten des GOES-Satelliten, fanden SENTMAN et al. eine starke Korrelation zwischen dieser Schwerewelle und der darunter liegenden Gewitterzelle [29].

*Bildunterschrift zu Abb. 3.4: Beobachtung einer konzentrisch verlaufenden Welligkeit im OH-Nachtleuchten, welche auf eine Schwerewelle zurückzuführen ist, die vom darunter liegenden Gewitter ausgelöst wurde und die sich sodann bis in eine Höhe von 85 Kilometer vertikal ausbreitete. Der im Teilbild gezeigte Sprite wurde von einer separaten CCD-Kamera aufgenommen. [29]*

Im Gegensatz zu den statistisch gewonnenen Ergebnissen des GPS/MET Experiments, liegt hier ein dediziertes Beispiel eines Gewittersturms (untere Atmosphäre) vor, welcher für die Anwesenheit von Schwerewellen in 85 Kilometern Höhe verantwortlich zeichnet. Somit ist der Nachweis erbracht, dass sich die Wirkung von Gewittern keineswegs nur auf die Troposphäre und Stratosphäre beschränkt, sondern auch in Höhen nahe der ionosphärischen E-Schicht auffinden läßt.

### 3.4 Vergleich der wissenschaftlichen Untersuchungen mit Amateurfunkstudien

In welchem Zusammenhang stehen die Spekulationen um Gewittereinflüsse auf die 144 MHz Sporadisch-E Ausbreitung mit den oben diskutierten wissenschaftlichen Ergebnissen? Zunächst gilt es, die Bedeutung der Begriffe *Gewittereinflüsse* und *144 MHz Sporadisch-E* zu beleuchten. In den Amateurfunkdiskussionen bleibt aus unserer Sicht die Bedeutung des Begriffs *Gewittereinfluss*<sup>5</sup> mehr oder weniger unklar, insbesondere fehlt der Hinweis, welche Eigenschaft eines Gewitters für die Erzeugung von Sporadisch-E eigentlich verantwortlich zeichnen soll. Tatsächlich scheinen viele Funkamateure zu vermuten, dass Sporadisch-E durch die Blitzentladungen eines Gewitters hervorgerufen werden kann. Diese Annahme ist jedoch mit einiger Sicherheit nicht

<sup>5</sup> Der deutsche Begriff *Gewittereinfluss* erscheint weit weniger zwingend wie der in der englischen Version verwendete Begriff der *thunderstorm effects* – die getroffene Wortwahl dient vor allem der Vermeidung des wenig ansprechenden Begriffs *Gewittereffekt*.

gerechtfertigt und hat möglicherweise zu den vielen kritischen Kommentaren beigetragen, mit denen die Möglichkeit von Gewittereinflüssen auf Sporadisch-E in Zweifel gezogen wird. In zahlreichen Spekulationen werden auch die erwähnten *Sprites* und *Jets* als mögliche Auslöser von Sporadisch-E angesehen, diese aber erst kürzlich entdeckten Phänomene (siehe z.B. [9] und die dort angeführten Literaturquellen) erlauben beim bisherigen Stand der Untersuchungen jedoch noch keine weitreichenden Schlussfolgerungen.

Wir sind bereit, auch unseren Projektitel als missverständlich einzustufen, denn Gewitter werden kaum direkten Einfluss auf die Entstehung von sporadischen E-Schichten nehmen können. Unsere Erwartung kann sich nur auf die in Abschnitt 3.1 diskutierte Kausalkette richten, welche an einem Ende durch das Phänomen der Gewitter und am anderen Ende durch das Phänomen Sporadisch-E begrenzt wird, wobei diese beiden Enden allerdings noch eine Vielzahl weiterer geophysikalischer Einflüsse einschließen. Gewitter können daher nur als ein Indikator von dynamischen Vorgängen in der unteren Atmosphäre angesehen werden, die eine Kaskade von atmosphärischen Prozessen einleiten können, welche eventuell die Erzeugung von Sporadisch-E zum Ergebnis haben.

Der Begriff *Sporadisch-E* verlangt ebenfalls eine Klärung. Im Vergleich zur Diskussion der GPS/MET Daten scheint der Begriff Sporadisch-E im Amateurfunk eine andere Bedeutung zu besitzen, denn hier werden nicht Irregularitäten in der E-Schicht angesprochen, sondern Fernverbindungen im 144 MHz Frequenzbereich (siehe die Ausführungen im Abschnitt 3.2.5). Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass Elektronendichte-Irregularitäten in der ionosphärischen E-Schicht nicht notwendigerweise UKW-Streuausbreitung zum Resultat haben müssen. Auch bedeutet das Vorhandensein einer sporadischen E-Schicht (d.h. einer vermehrten Elektronendichte in circa 105 km Höhe) nicht notwendigerweise die Möglichkeit von Sporadisch-E DX-Verbindungen im UKW-Bereich.

Tatsächlich kann die Vorwärtsstreuung von ultrakurzen Radiowellen nicht mit der Radiowellenausbreitung im Kurzwellenbereich unterhalb von 30 MHz gleichgesetzt werden, denn die hierfür notwendigen Elektronendichten sind in der Erdatmosphäre gar nicht anzutreffen. 144 MHz Sporadisch-E QSOs stehen vielmehr mit komplizierten plasmaphysikalischen Prozessen in Verbindung, die zahlreiche Wellenphänomene in der E-Schicht hervorrufen und schließlich die *kohärente Streuung* von UKW-Radiowellen mit hohen Empfangsfeldstärken zum Ergebnis haben können. Im Gegensatz zu dem einfachen Modell der durch ein ionisiertes Medium reflektierten Radiowellen (welches im Kurzwellenbereich erfolgreich angewendet werden kann), gilt es hier, elektrostatische Felder in der E-Schicht, das erdmagnetische Feld und insbesondere die Driftbewegung der Elektronen und Ionen und die Stoßwechselwirkung mit den Neutralgasteilchen zu berücksichtigen, damit dieser Funkausbreitungstyp zutreffend beschrieben werden kann.

Bewertet man die obigen wissenschaftlichen Ergebnisse im Hinblick auf die Zielsetzung dieses Aufsatzes, so gilt es festzustellen, dass Wissenschaftler und Funkamateure zwar ähnliche, aber eben nicht identische Sachfragen behandeln. Das wissenschaftliche Material vermittelt zwar wertvolle Hinweise, einen Beweis für Gewittereinflüsse auf die 144 MHz Sporadisch-E Ausbreitung vermag es jedoch nicht zu liefern. **Abb. 3.5** versucht, die unterschiedliche Ausrichtung der wissenschaftlichen Untersuchungen und der Amateurfunkstudien in einem gemeinsamen Schema zu verdeutlichen. Die weiße Fläche beschreibt dabei das bereits in **Abb. 3.1** diskutierte Szenario, d.h. den möglichen Zusammenhang zwischen der Dynamik der unteren Atmosphäre und der Entstehung von sporadischen E-Schicht Irregularitäten. Die graue Fläche beschreibt hingegen die von Funkamateuren zusätzlich eingeführten Phänomene, d.h. das Auftreten einer 144 MHz Sporadisch-E Fernausbreitung und von Sferic-Aktivitätszentren. Diese zusätzlichen Merkmale stellen sozusagen eine beiderseitige Erweiterung der in Abschnitt 3.1 diskutierten Kausalkette dar. Obwohl der wissenschaftliche Kern dieser Kausalkette noch nicht als endgültig verifiziert gelten kann, beabsichtigen Funkamateure somit die sinnbildliche Verlängerung dieser Kausalkette über ihre ursprünglichen Grenzen hinaus.

***Bildunterschrift zu Abb. 3.5:** Schematische Darstellung der von Funkamateuren versuchten Aufdeckung von Gewittereinflüssen auf Sporadisch-E. Die weiße Fläche beschreibt das wissenschaftliche Modell, die graue Fläche die von Funkamateuren zusätzlich eingeführten Sachfragen.*

**Abb. 3.5** mag insbesondere den prinzipiellen Unterschied zwischen wissenschaftlicher Untersuchung und Amateurfunkstudie verdeutlichen: wissenschaftliche Instrumente können jedes Element der Kausalkette individuell untersuchen, können die Zusammenhänge zwischen benachbarten Elementen gezielt adressieren und können die gesamte Kausalkette systematisch analysieren. Funkamateure können, wieder sinnbildlich, nur die äußeren Enden dieser Kausalkette studieren, d.h. die Vielzahl der dazwischen liegenden Prozesse und Mechanismen bleiben uns verborgen. Da die Phänomene Sporadisch-E und Sferics an den gegenüberliegenden Enden dieser Kette liegen, kann man nur schwerlich eine starke Korrelation zwischen diesen Phänomenen vermuten. Wäre eine solche starke Korrelation tatsächlich vorhanden, dann würden Gewitter erheblichen Einfluss auf die Sporadisch-E Funkausbreitung nehmen können, was offensichtlich nicht der Fall ist. Betrachtet man ferner die Sferics als Indikator für Gewitter und Gewitter als Indikator für dynamische Prozesse, die Schwerewellen auslösen können, dann wird deutlich, dass Sferics nur ein äußerst indirektes Hilfsmittel bei der Untersuchung der eigentlich interessierenden Phänomene verkörpern.

Funkamateure stehen somit einer komplizierten Problemlage gegenüber, wenn sie die Möglichkeit von Gewittereinflüssen auf die

144 MHz Sporadisch-E Ausbreitung zu untersuchen beabsichtigen: unsere Situation kann daher mit einem Piloten verglichen werden, der ohne verlässliche Navigationsinstrumente in einem unbekanntem Luftraum Orientierung sucht. Aus diesem Grund erscheint daher auch eine Garantie unmöglich, ob dieser Fall –in der einen oder anderen Richtung- erfolgreich abgeschlossen werden kann.

## 4 Beschreibung des Analyseprojekts

### 4.1 Das Projektteam

Unser Projekt wurde im Frühjahr 2004 gestartet und umfasst ein internationales Team von sechs Funkamateuren: CREMER, DL1DBC, entwickelt und betreibt die Datenerfassungs- und Datenauswertesoftware sowie die zugehörige Datenbank und nimmt die Kontakte zu jenen Wetterdiensten wahr, die aktuelle Sferic-Informationen verbreiten. LANGENOHL, DK5YA, stellt die Sporadisch-E Beobachtungen aus seinen *Europäischen Es-Auswertebereichten* [49] zur Verfügung und organisiert den Zugang zu Wetterinformationsarchiven. MUNTERS, PE1NWL, betreibt den *DXrobot* Internetdienst [50] und trägt somit aktuelle Sporadisch-E Informationen aus der Gemeinde der Funkamateure bei. Die Datenverbindung zwischen seinem und CREMERS Rechnersystem stellt die benötigten kurzen Reaktionszeiten sicher. SAMPOL, EA6VQ, unterstützt das Team mit seiner Erfahrung bei der Auswertung von 144 MHz Sporadisch-E Bandöffnungen und trägt die Daten und Ergebnisse seiner Studien bei [51]. KRAFT, DL8HCZ, Chefredakteur der Amateurfunkmagazine *DUBUS* und *Funk-Telegramm*, sichtet relevante Amateurfunkpublikationen und recherchiert die Details von Amateurfunkbeobachtungen. GRASSMANN, DF5AI, berichtet den jeweils aktuellen Projektstand auf der Internetseite *Amateur Radio Propagation Studies* [47] und nimmt die Kontakte zu wissenschaftlichen Institutionen wahr.

### 4.2 Datenerfassung und -auswertung

#### 4.2.1 Allgemeiner Überblick

Das Projekt nutzt insbesondere die vorhandenen meteorologischen Informationsdienste sowie die zahlreichen Funkausbreitungs-Alarmnetze und -Auswertedienste im Amateurfunk, siehe **Abb. 4.1**. Auf Grund der hohen geografischen Dichte von UKW-Amateurfunkstationen in Europa bleibt zumindest die Mehrzahl der Sporadisch-E Ereignisse kaum verborgen, sofern diese Funkwellenfernausbreitung im 144-MHz-Bereich ermöglichen. Die Gemeinschaft der Funkamateure (siehe den oberen linken Kasten) stellt daher die Rohdaten zur Verfügung, indem entsprechende DX-Informationen über das OH9W/OH2AQ DX Cluster Netz [45] verbreitet werden oder indem entsprechende Logbuchinformationen beispielsweise beim Auswertedienst von DK5YA [49] eingereicht werden (siehe Bildmitte). Die DX Cluster Daten werden kontinuierlich vom DXrobot Dienst von PE1NWL [50] überwacht, welcher im Bedarfsfall entsprechende Benachrichtigungen per Email, Mobiltelefon oder Funkrufempfänger verteilt (siehe den linken unteren Kasten). Dieser Dienst aktiviert ferner die *Sferics Retriever* Software von DL1DBC, die sodann aktuelle Sporadisch-E Daten und Sferic-Informationen aus dem Internet lädt (siehe den zentralen Kasten am unteren Bildrand). Somit werden alle relevanten Daten auf dem Rechnersystem von DL1DBC konzentriert, wo auch die Datenauswertung und die grafische Visualisierung verwirklicht wird (unterer rechter Kasten).

*Bildunterschrift zu Abb. 4.1: Schematisches Übersicht über den Datenfluss im Analyseprojekt.*

#### 4.2.2 Sferic-Daten

Sferic-Daten werden durch verschiedene Wetterinformationsdienste im Internet verbreitet, siehe z.B. die Dienste *Wetterzentrale* [40] oder *WetterOnline*, die Funkbeobachtungsdaten beispielsweise von der *European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID)* [42], vom *Blitzinformationsdienst von Siemens (BLIDS)* [41] oder vom britischen *Tornado and Storm Research Organisation (TORRO)* [43] verarbeiten, beim letzteren Dienst handelt es sich um eine private Forschungsinitiative, die Daten des *ATD Systems* des britischen Wetterdienstes [44] nutzt. BLIDS betreibt beispielsweise sechzig Tiefstfrequenzsensoren in Deutschland, in der Schweiz, Frankreich und weiteren Nachbarländern, während der britische Dienst Funkempfänger in Cornwall, auf den Shetland Inseln und auch auf Island, in Finnland, an der deutschen Nordseeküste, Gibraltar und auf Zypern unterhält. Der britische Wetterdienst beschreibt die Genauigkeit seiner Messungen mit circa 5 Kilometer innerhalb des Vereinigten Königreichs und zwischen 20 und 100 Kilometer im restlichen Europa. Vor der Anwendung der Sferic-Internetdaten ist die Beachtung der jeweiligen Beobachtungszeiträume angeraten, so stellt beispielsweise die Wetterzentrale nur Daten jeweils einer Tageshälfte zur Verfügung, was auf die Auswertemöglichkeiten erheblichen Einfluss nimmt.

#### 4.2.3 Automatische Datenerfassung

Alle Sferic-Daten werden von den jeweiligen Internetquellen „just-in-time“ geladen, denn bei einem späteren Abruf würden die Daten durch zwischenzeitliche Aktualisierungen und Überschreibungen verloren gehen. Die Datensammlung erfolgt mittels einer

TCP Client Software, die von PE1NWLs DXrobot [50] initiiert wird. Der DXrobot beinhaltet zwei Module, d.h. einem TCP Client als Frontend zur Suche entsprechender Datenmuster, die auf Sporadisch-E Ereignisse in den Daten des OH9W/OH1AQ DX Clusters [45] hinweisen, und andererseits ein Alarmierungssystem, welches die beim Dienst angemeldeten Funkamateure über besondere Funkausbreitungsbedingungen unterrichtet. MUNTERS hat dazu eine Statustabelle eingerichtet, die die Zustände *ruhig*, *hohe MUF* (maximum usable frequency) und *E-Skip Alarm* kennzeichnet.

Im Bereitschaftsmodus wird der DXrobot in fünfzehnminütigem Rhythmus von DL1DBC's Sferics-Retriever Software abgefragt. Im Falle der Warmmeldung *hohe MUF* aktiviert die Sferics Retriever Software ihren Voralarmstatus, indem sie den Abfragezyklus auf fünf Minuten reduziert. Bei der höchsten Warnstufe *E-Skip Alarm* aktiviert die Software das automatisierte Herunterladen aktueller Sferic-Informationen aus dem Internet, die anschließend in einer lokalen SQL-Datenbank abgelegt werden. Der Alarmzustand der Sferics Retriever Software wird beendet, sobald der DXrobot das Ende der jeweiligen Bandöffnung anzeigt. Die Sferics Retriever Software wurde mit der Programmiersprache Perl entwickelt und wird in einer LINUX Serverumgebung eingesetzt.

#### 4.2.4 Sporadisch-E DX Informationen

Die beiden Teammitglieder LANGENOHL (DK5YA) und SAMPOL (EA6VQ) betreiben bereits seit mehreren Jahren zwei Internetseiten zur Sammlung und Auswertung von UKW DX-Ereignissen im Amateurfunk (siehe [49] bzw. [51]). Diese Daten wurden zur Auswertung der in der Sporadisch-E Saison 2004 geführten 144 MHz DX QSOs herangezogen. Die Datenbestände gehen somit auf die Gemeinschaft der europäischen UKW-Funkamateure zurück, von denen ein große Anzahl aktuelle Beobachtungsberichte oder Funkstations-Logbücher zur Auswertung einreichen bzw. im Internet hochladen.

Die Amateurfunk-Logbücher liegen jedoch in unterschiedlichsten Datenformaten vor, weshalb die Informationen nicht unmittelbar in eine Datenbank übertragen werden können, d.h. zur Identifizierung beispielsweise von Rufzeichen, UTC-Angaben, geografischer Positionen (als QTH Kenner), Signalfeldstärken und anderer Informationen ist eine durchaus aufwendige Voranalyse erforderlich. CREMER hat zu diesem Zweck ein Perl-Skript entwickelt, mit welchem über 97 Prozent der DX Informationen automatisch erfasst werden können, so dass nur die verbleibenden drei Prozent eine manuelle Bearbeitung erforderlich machen. Ohne diese Softwareunterstützung wären unsere Studien auf Grund der grossen Datenmengen kaum in sinnvoller Zeit zu bewältigen.

#### 4.2.5 Derzeitige Analysewerkzeuge

In der Vorbereitungsphase des Projekts haben wir vornehmlich auf die Sferic-Verteilungskarten zurückgegriffen, die vom WetterOnline Dienst [39] zur Verfügung gestellt werden. Da numerische Sferic-Informationen nicht zur Verfügung stehen, wir somit die Verteilungskarten in der vorliegenden Form weiterverarbeiten müssen, ergibt sich eine nicht unerhebliche Einschränkung bei der Flexibilität der grafischen Ergebnisdarstellung. Die Streckenmittelpunkte der berichteten Sporadisch-E Verbindungen werden daher in eben diese Verteilungskarten unmittelbar eingezeichnet. Zukünftig planen wir ein breites Spektrum von Auswertehilfsmitteln, eines der beabsichtigten Methoden wird in Abschnitt 4.4 beschrieben.

Funkamateure, die eigene Datenauswertungen verwirklichen möchten, werden auf die Beachtung der jeweils im Internet verwendeten Kartenprojektionen hingewiesen, die in vielen Fällen leider nicht ausreichend erklärt werden. Für Berechnungsroutinen und Quelltexte stehen zahlreiche Internetquellen zur Verfügung, siehe z.B. [10] und [46]. Als besonders nützlich erachten wir die *Mapping Tools* [34], die von WESSEL und SMITH, Universität von Hawaii, unter der GNU *General Public Licence* (siehe [34] und die dort angegebenen Literaturquellen) verbreitet werden.

### 4.3 Erste Ergebnisse aus der Sporadisch-E Saison 2004

Im Mai/Juni 2004 ging das oben beschriebene Datenerfassungssystem in den Wirkbetrieb, leider war die Sporadisch-E Saison 2004 jedoch durch nur wenige Sporadisch-E DX-Ereignisse gekennzeichnet. Dennoch fanden wir mit dem 27. Juni 2004 ein Sporadisch-E Ereignis, welches im Sinne dieses Aufsatzes unser besonderes Interesse fand.

**Bildunterschrift zur Abb. 4.2:** Sporadisch-E Bandöffnung vom 27. Juni 2004. Die vertikalen Balken kennzeichnen die Anzahl der Zweiweg-DX-QSOs pro 15 Minuten (linke Skala). Die durchgezogene Linie beschreibt die kumulierte Anzahl der QSOs im Tagesverlauf (rechte Skala). Siehe auch die farbige Version dieser Graphik auf den Umschlagseiten.

**Bildunterschrift zur Abb. 4.3:** Streckenmittelpunkte der QSOs zur Kennzeichnung der geografischen Position der Sporadisch-E Wolken am 27. Juni 2004. Die Farbgebung ist identisch zu **Abb. 4.4**, d.h. die roten und rosafarbenen Positionsmarkierungen entsprechen den QSOs zwischen 12.30 und 15.30 UTC. Siehe auch die farbige Version dieser Graphik auf den Umschlagseiten.

**Bildunterschrift zu Abb. 4.4:** Geografische Verteilung der Sferics am 27. Juni 2004 zwischen 09 und 12.30 UTC (links) und 08 und 17 UT (rechts). Der Farbcode kennzeichnet die Anzahl der Sferics pro 30 Minuten. Originaldaten aus [39], nachbearbeitete Daten aus [48].

**Abb. 4.2** zeigt die Häufigkeit der 144 MHz DX QSOs im Tagesverlauf, wobei verschiedene Aktivitätsphasen zwischen 08 und 17 UT sichtbar werden. Durch Bestimmung der QSO-Streckenmittelpunkte haben wir die geografische Lage der jeweiligen Sporadisch-E Wolken ermittelt, siehe **Abb. 4.3**. Vormittags zwischen 08 und 09 UT befanden sich die Sporadisch-E Zentren in einem weiten Gebiet über der Adria (grün), welches sich dann Richtung Norditalien (gelb) verschob. Am Nachmittag zeigt die geografische Verteilung der Sferic-Registrierungen ein bemerkenswertes Detail, d.h. ein Gewitterband, welches sich in einem 200 bis 400 Kilometer breiten Korridor von Südfrankreich bis nach Ostdeutschland über mehr als 1500 Kilometer ausdehnte (rot, rosa).

Die Daten des WetterOnline Dienstes [39] zeigen zwischen 08 und 12 UT eine nur geringe Sferic-Aktivität in Zentraleuropa. Insbesondere steht weder das grüne noch das gelbe Sporadisch-E Aktivitätsgebiet mit einer Gewittertätigkeit in Verbindung, d.h. diese Sporadisch-E Bandöffnungen sind mit Sicherheit nicht auf gewitterbedingte Phänomene zurückzuführen.

Ab 12.30 UT verstärkte sich die Sferic-Aktivität zunehmend, wobei einige Regionen mehr als 60 Sferic-Ereignisse pro 30 Minuten anzeigen (in einem kleinen Gebiet in Frankreich erreichte die Aktivität sogar 80 Sferics/30 Minuten, was auf eine heftige Gewittertätigkeit hindeutet). Erstaunlicherweise zeigt die geografische Verteilung dieser Sferic-Aktivität eine hohe Übereinstimmung mit dem in **Abb. 4.3** gezeigten Band der Sporadisch-E Aktivität (der interessierte Leser kann eine animierte Darstellung der Vorgänge auf CREMERS Internetseite [48] einsehen).

Wir wollen die Befunde nicht als Beweis für die Wirkung von Gewittern auf die 144 MHz Sporadisch-E Ausbreitung deuten, denn eine zufällige Übereinstimmung zwischen der Sferic- und Sporadisch-E Verteilung ist in diesem Beispiel nicht auszuschließen (zumal zentraleuropäische Sommergewitter einen Südwest-Nordost Verlauf öfters aufzuweisen scheinen). Dennoch betrachten wir die gezeigten Ergebnisse als bemerkenswert und sehen deshalb die Notwendigkeit für weitere Analysen.

#### 4.4 Nächste Schritte in der Datenauswertung

Geografische Auswertungen gemäß **Abb. 4.3** und **4.4** können sicherlich nützliche Hinweise auf ausgewählte Sferic- und Sporadisch-E Ereignisse liefern, die statistische Analyse umfangreicher Datensätze aus Langzeitbeobachtungen kann diese Darstellungsmethode jedoch nicht unterstützen. Untersucht man beispielsweise alle Sporadisch-E Ereignisse der Jahre 1990 bis 2004, so würden die zahlreichen überlappenden Datenpunkte den Aussagewert einer jeden Kartendarstellung in Frage stellen, da der Betrachter systematische Eigenschaften in der Datenverteilung gar nicht mehr wahrnehmen kann.

Wir betrachten statistische Auswertungen jedoch als notwendig und wichtig, denn beim Studium nur einzelner Ereignisse bleibt immer der Zweifel um mögliche Zufallsresultate. **Abb. 4.6** regt daher eine alternative Methode an, bei der zu jedem Sferic-Ereignis der jeweilige Zeitunterschied sowie die jeweilige Entfernung zu den Sporadisch-E Ereignissen ermittelt wird. Nimmt man also N Sferic-Daten und M Sporadisch-E Ereignisse an, dann wird der neue Datensatz insgesamt NM Einträge besitzen, wobei ein jeder den Zeitunterschied und die Entfernung zwischen jeweils einem Sferic und einem Sporadisch-E Ereignis angibt. Auf diese Weise werden die absoluten Informationen in relative Angaben überführt, d.h. an die Stelle der geografischen Koordinaten und UTC-Angaben treten nun Entfernungen  $d$  und Zeitunterschiede  $\Delta t$ . Mit dieser Methode können nunmehr alle zugänglichen Daten in nur einem Diagramm zusammengefaßt werden, siehe **Abb. 4.7**.

***Bildunterschrift zu Abb. 4.6:** Datensatz, der die Zeitunterschiede und die Entfernungen aller Sferic-Ereignisse zu allen Sporadisch-E Ereignissen angibt.*

Unter der Annahme, dass die Sferic-Daten und Sporadisch-E Daten auf keinerlei Weise räumlich oder zeitlich korreliert sind, würde der beschriebene Datensatz eine zufällige Datenpunktverteilung (grafisches Rauschen) anzeigen, siehe Diagramm a in **Abb. 4.7**. Würde hingegen eine irgendwie geartete Korrelation zwischen den Daten tatsächlich bestehen, so würde sich diese durch eine Häufung von Datenpunkten artikulieren, was in den weiteren Diagrammen an Hand von fiktiven Beispielen erläutert wird. Beispielsweise zeigt Diagramm b einen fiktiven Datensatz, bei welchem die Sferic-Ereignisse und Sporadisch-E Positionen sich zwar in räumlicher Nähe befinden, dabei jedoch einen variablen Zeitunterschied aufweisen. Ein solches Szenario könnte durch Schwerewellen gedeutet werden, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit aus der unteren in die obere Atmosphäre vertikal ausbreiten. Diagramm c zeigt das Beispiel von Schwerewellen, die sich gleichzeitig auch in horizontaler Richtung fortpflanzen, hier würde man daher einen entfernungsabhängigen Zeitverschiebung feststellen können. Diagramm d zeigt schließlich die fiktive Situationen von Sporadisch-E Ereignissen, die sich mehr oder weniger simultan und in unmittelbarer Nachbarschaft zur Sferic-Aktivität entwickeln.

Wir können nicht vorhersagen, welche Strukturen bei Verwendung wirklicher Daten sichtbar werden, wir glauben jedoch, dass die beschriebene Methode ein nützliches Hilfsmittel zur Untersuchung langer Datenreihen darstellen könnte. Jedoch ist diese Datenbasis noch nicht verfügbar, weshalb wir leider noch keine konkreten Ergebnisse vorlegen können. Eine praktische Schwierigkeit erwächst allerdings aus der Tatsache, dass wir momentan keinen Zugriff auf numerische Sferic-Koordinaten besitzen, um die Entfernungsberechnungen vornehmen zu können. Somit wären die geografischen Angaben aus den Sferic-Landkarten abzu-

leiten, was eine aufwendige Nachbearbeitung dieser Grafiken zur Konsequenz hätte.

***Bildunterschrift zu Abb. 4.7:** Diagramme, die die relative Zeitverzögerung und die Entfernungen zwischen Sferic- und Sporadisch-E Ereignissen darstellen. Die Diagramme zeigen fiktive Daten, siehe Text.*

## 5 Zusammenfassung und Schlußbemerkungen

Atmosphärenwissenschaftler scheinen das Vorhandensein von Gewittereinflüssen auf die Ionosphäre aus drei Gründen in Erwägung zu ziehen:

- Zahlreiche ionosphärische Phänomene stehen eindeutig mit Schwerewellen in Verbindung, die sich in der E und F Region ausbreiten. Schwerewellen werden insbesondere als ein möglicher Auslösemechanismus von Windscherungen in circa 100 km Höhe angesehen, die ihrerseits die Entstehung von Sporadisch-E bewirken können.
- Schwerewellen, die ihren Ursprungsort in der Troposphäre und in der Stratosphäre finden, können sich bis in die Mesosphäre (80 km) ausbreiten, weshalb diese wahrscheinlich auch das Höhenniveau der D- und E-Schicht zwischen 90 und 110 km zu erreichen in der Lage sind.
- Es gilt als anerkannte Tatsache, dass die mit Gewitterstürmen verbundene Konvektion Schwerewellen in der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre auslösen können.

Die Wissenschaftler glauben weiterhin, dass diese drei Einzelphänomene zumindest teilweise auch in Kombination auftreten können. Somit können Gewitter Schwerewellen hervorrufen, die sich von der unteren in die obere Atmosphäre ausbreiten, wo sie in der E-Schicht Windscherungen hervorrufen, die schließlich die Entstehung von Sporadisch-E stimulieren oder begünstigen können. Das Modell erscheint vielen Wissenschaftlern plausibel, so weit wir dies einschätzen können, scheinen jedoch noch nicht alle Einzeleinheiten als verifiziert zu gelten. Dennoch deuten wissenschaftliche Messungen in eben diese Richtung. In diesem Aufsatz wurden zwei Beispiele gewählt, die in der wissenschaftlichen Literatur behandelt werden:

- Der von der Universität von Alaska dokumentierte Gewittersturm über Nebraska liefert nachhaltige Beweise für gewitterinduzierte Schwerewellen, die sich in die Mesosphäre ausbreiten (nachgewiesen durch optische Beobachtungen des OH Nachtleuchtens in 85 km Höhe). Freilich ist die Mesosphäre nicht identisch zur Ionosphäre, aber es bedarf nur geringer Phantasie, sich Schwerewellen vorzustellen, die sich über die 85 Kilometer hinaus auch in größere Höhen fortpflanzen.
- Die statistischen Auswertungen des GPS/MET Experiments verweisen zusätzlich auf eine erstaunliche Korrelation zwischen der Gewitter- und Schwerewellenaktivität in der unteren Atmosphäre und Elektronendichte-Irregularitäten in der ionosphärischen E-Schicht. Jedoch haben wir darauf hingewiesen, dass die gezeigten E-Schicht Irregularitäten nicht notwendigerweise mit den von Funkamateuren berichteten Sporadisch-E Ereignissen im UKW-Bereich gleichgesetzt werden dürfen.

Leider verfügen Funkamateure nicht über ein Instrumentarium zum Nachweis von Schwerewellen, weshalb die Hinzuziehung von geeigneten Indikatoren erforderlich wird. Die von Gewittern ausgelösten Schwerewellen treten in Verbindung mit ausgeprägten Aufwärtsströmungen auf (konvektiv erzeugte Schwerewellen), die eine Ladungstrennung innerhalb der Gewitterwolke und schließlich entsprechende Wolken-Wolken- oder Wolken-Boden-Blitze zum Ergebnis haben. Jeder Blitz erzeugt dabei einen Sferic, d.h. einen kurzzeitigen Hochfrequenzimpuls, der mit geeigneten Richtungspeilern einfach aufgezeichnet werden kann. Durch die Analyse der geografischen Sferic-Verteilung erhält man somit zuverlässige Angaben über den Aufenthaltsort von Gewittern. Allerdings breiten sich Schwerewellen in vertikaler und horizontaler Richtung aus, weshalb der Ankunftsort der Schwerwelle in der E-Schicht von den Gewitterpositionen erheblich abweichen kann. Sferics können daher Gewitterpositionen anzeigen, Sporadisch-E Positionen können jedoch nur kaum vorhergesagt werden.

Dennoch haben unsere frühen Untersuchungen Sferic- und Sporadisch-E Positionen unmittelbar verglichen, wobei die Beobachtungsergebnisse aus der europäischen Sporadisch-E Saison 2004 herangezogen wurden. Die Sferic-Positionen wurden den Internetseiten des WetterOnline Dienstes entnommen, die Sporadisch-E Positionen wurden aus den 144 MHz DX QSOs von Funkamateuren abgeleitet. Es war nicht überraschend, viele Sporadisch-E Ereignisse vorzufinden, die mit Gewitterstürmen offenbar in keinerlei Zusammenhang standen. Wir glauben, dass in der Tat nur weniger als zehn Prozent der Sporadisch-E Ereignisse in mittleren Breiten durch Gewitter ausgelöst werden, wenn ein solcher Zusammenhang überhaupt bestehen sollte. Wir waren jedoch erstaunt, mit dem 27. Juni 2004 ein Beispiel vorzufinden, in welchem die geografische Verteilung der Sporadisch-E Aktivität zur Sferic-Verteilung nahezu identisch ist.

Landkartendarstellungen scheinen jedoch zur Untersuchung der räumlich-zeitlichen Korrelation zwischen Sporadisch-E und Sferics wenig geeignet. Kartendarstellungen können nur kurze Beobachtungsreihen sinnvoll darstellen (anderenfalls wäre die Landkarte mit zu vielen Datenpunkten übersät) und können mögliche Zeitverschiebungen zwischen Sferic- und Sporadisch-E Ereignissen nicht auflösen. Aus diesem Grunde haben wir eine alternative Methode vorgeschlagen, welche an Stelle von absoluten nur relative Informationen verarbeitet, also Entfernungen und Zeitverschiebungen an Stelle von geografischen Daten und UTC-Zeitangaben. Mit dieser Methode können auch lange Beobachtungsreihen in nur einem Diagramm zusammengefaßt werden, was zukünftige statistische Untersuchungen hoffentlich unterstützen wird. Leider verfügen wir momentan jedoch nicht über die für Entfernungsberechnungen benötigten numerischen Sferic-Daten, weshalb unser Projekt momentan praktische Hindernisse erfährt, die es alsbald zu beheben gilt.

Betrachtet man das wissenschaftliche Material und vielleicht auch unsere Untersuchungsergebnisse zum 27. Juni 2004, so kann man die Möglichkeit von Gewittereinflüssen auf die Sporadisch-E Funkwellenausbreitung nicht grundsätzlich ausschließen. Andererseits erscheint es angesichts des aktuellen Untersuchungsstands verfrüht, solche Einflüsse bereits als gegeben anzunehmen. Ferner behandelt unser Aufsatz nur ein mögliches Modell, d.h. alternative Modelle sind ebenfalls wert, genauer beleuchtet zu werden. GRAYER lenkt unsere Aufmerksamkeit beispielsweise die von Gewitterwolken erzeugten „elektrischen Felder, die bekannter Weise eine Aufwärtsdrift der atmosphärischen Elektronen in Richtung E-Schicht hervorrufen und diese bis zu 100-300 kV aufladen“ [52]. Er sieht hierin einen „gleichermaßen interessanten und (seiner Meinung nach) vielleicht überzeugenderen Mechanismus für die Kopplung zwischen Gewitter und Es“, jedoch hat dies Modell noch keine wissenschaftliche Beachtung gefunden [52].

Der Einfluss von Gewittern auf die Sporadisch-E UKW-Ausbreitung bleibt daher ein offenes Thema im Bereich der Amateurfunk-Funkausbreitungsstudien, welches allerdings wert ist, noch eingehender untersucht zu werden. Die Autoren hoffen, mit diesem Aufsatz einige neue Gesichtspunkte und Einzelheiten beigetragen zu haben. Auch hoffen wir, die Zusammenarbeit zwischen Funkamateuren bei dieser faszinierenden Aufgabenstellung stimulieren zu können, welche Elemente aus der Meteorologie (Gewitter) kombiniert mit Elementen aus der Ionosphärenphysik (Sporadisch-E), der Tiefwellentechnik (Funkempfang von Sferics), dem UKW Funkbetrieb (144 MHz DX QSOs), Internetanwendungen (Wetterinformations- und DX-Alarmierungsdienste), Softwareentwicklung (Datenakquisition und -auswertung) und Datenanalysemethoden.

*Danksagung:* Die Autoren danken allen Wetterinformationsdiensten, die unsere Studien unterstützt haben. Wir danken insbesondere der *WetterOnline Meteorologische Dienstleistungen GmbH*, dem *Blitzinformationsdienst von Siemens (BLIDS)* und der *Wetterzentrale Georg Müller* für die Genehmigung, die jeweiligen Online-Daten in unseren Analysen verwenden zu dürfen. G. GRAYER (G3NAQ) danken wir für zahlreiche nützliche Hinweise und die kritische Durchsicht des Manuskripts. Den vielen UKW-Funkamateuren danken wir für die zahlreichen Beobachtungsdaten, die unseren Internetseiten zur Verfügung gestellt wurden und unsere Studien maßgeblich unterstützten.

[Hinweis: Die Literaturquellen sind am Ende der englischsprachigen Version dieses Aufsatzes zu entnehmen.]