

Universität
Rostock



Traditio et Innovatio



VHF-Radarechos aus der E-Schicht in 54° N: Statistik und physikalische Prozesse

**Bachelor-Arbeit
angefertigt am Institut für Physik
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Rostock
und am Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik in Kühlungsborn**

von Helen Schneider, geb. am 22.09.1989

**Betreuer und 1. Prüfer : Prof. Dr. M. Rapp, Universität Rostock/IAP Kühlungsborn
2. Prüfer: Dr. M. Zecha, IAP Kühlungsborn**

Rostock, den 17. August 2012

Abstract

This paper discusses analysis of VHF-Radarechoes in the E-layer at 54°N. The echoes were detected by the OSWIN-Radar in Kühlungsborn. With the aid of MATLAB software relevant statistical properties were identified. The characteristic frequency distribution, a high electron density as well as the established dependency of strong tidal amplitudes allows to conclude possible physical processes on which the echoes are based. The theory that Echoes correlate with sporadic E-layers was further supported by this paper.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Untersuchungen von VHF-Radarechos in der E-Schicht bei 54°N dargestellt. Die Echos wurden mit dem OSWIN-Radar in Kühlungsborn detektiert. Mit Hilfe von MATLAB-Programmen wurden wesentliche statistische Eigenschaften der Echos ermittelt. Die charakteristische Häufigkeitsverteilung, eine hohe Elektronendichte sowie die nachgewiesene Abhängigkeit von großen Gezeiten Amplituden lassen auf mögliche physikalische Prozesse schließen, auf denen die Echos basieren. Die These, dass Echos in einem Zusammenhang zu den sporadischen E-Schichten stehen, wurde mit den Ergebnissen dieser Arbeit weiter unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	2
1.1.1	Die Atmosphäre der Erde	2
1.1.2	Die Ionosphäre	5
1.1.3	Die sporadische E-Schicht	7
1.1.4	Das Radar	10
2	Datenmaterial und Messungen	17
2.1	Beobachtungen	17
2.2	Statistische Eigenschaften	18
3	Diskussion	25
3.1	Turbulenzen	25
3.2	Sporadische E-Schicht	26
3.2.1	Messwerte	32
4	Zusammenfassung	39
	Abbildungsverzeichnis	41
	Tabellenverzeichnis	43
	Literaturverzeichnis	45

Kapitel 1

Einleitung

Die physikalischen Prozesse in der Atmosphäre werden durch den variierenden Dichteverlauf beeinflusst. Der Dichteverlauf der Atmosphäre nimmt mit der Höhe exponentiell ab.[3] Ab etwa 80 km Höhe beträgt die mittlere freie Weglänge der einzelnen Gasteilchen mehrere Kilometer. Der Höhenbereich von 80 bis 500/600 km wird als Ionosphäre bezeichnet. Die Gasmoleküle in der Ionosphäre werden durch Absorption der kurzwelligigen Strahlung der Sonne ionisiert, wodurch viele freie Ladungsträger vorhanden sind. Innerhalb der Ionosphäre können besonders aufgrund der Ionisationsprozesse, interessante Phänomene beobachtet werden. [2] Da gibt es die Polarlichter, welche vor allem im hohen Norden beobachtet werden, die leuchtenden Nachtwolken oder auch die sporadischen E-Schichten. Letztere sind in ihrer Entstehung und ihrem Verhalten noch nicht genau ergründet.

Bekannt ist, dass sie nur gelegentlich innerhalb der E-Schicht der Ionosphäre auftreten und eine hohe Elektronendichte vorweisen. Zudem sind sie sehr stark lokalisiert. Aufgrund der hohen Elektronendichte können an der sporadischen E-Schicht Signale reflektiert und Echos empfangen werden. Die Echos weisen dabei eine sehr hohe Frequenz auf, die im dreistelligen MHz-Bereich liegen kann. Dies deutet auf eine starke Elektronenverdichtung hin. [4] Die allgemein akzeptierte Entstehungstheorie der sporadischen E-Schichten wird durch den 'Windshear-Mechanismus' beschrieben. Der vollständige Prozess zur Ausbildung der sporadischen E-Schichten ist allerdings noch nicht aufgeklärt. [5]

Ein weiteres interessantes Phänomen, welches nicht auf Ionisationsprozesse beruht, ist die zeitlich periodische Schwankung des Windes in Höhen ab 80 km. Diese Schwankung wird durch die Gezeiten und planetare Wellen hervorgerufen. Die Abweichungen um den gemittelten zonalen Wind variieren mit dem Amplitudengang der halbtägigen Gezeit. Ist der Amplitudengang der halbtägigen Gezeit sehr stark, so äußert sich dies

in großen Abweichungen vom gemittelten zonalen Wind.

In dieser Arbeit werden VHF-Radarechos untersucht, die im Breitenbereich von 54 °N gemessen wurden. Die Echos wurden in einem Höhenbereich von 95 km bis 116 km beobachtet und befinden sich somit im Bereich der E-Schicht der Ionosphäre. Anhand der Signalstärke des reflektierten Signals (Signal to Noise Ratio) und ihren hohen Grenzfrequenzen, lässt sich auf eine hohe Elektronendichte schließen.

Um nachzuvollziehen, warum die beschriebenen Echos beobachtet werden können, werden zunächst im Kapitel 1 die theoretischen Grundlagen erklärt. Dabei wird insbesondere der Aufbau der Atmosphäre, der Ionosphäre und die Prozesse zur Entstehung von sporadischen E-Schichten betrachtet. Des weiteren wird auf die Radartechnik, mit Spezialisierung auf dem OSWIN-VHF-Radar, eingegangen. Mit dem OSWIN-VHF-Radar wurden die hier zugrunde liegenden Messungen durchgeführt.

In Kapitel 2 erfolgt eine Dartsellung der Messungen sowie deren statistische Auswertung.

Ob Phänomene, wie die sporadische E-Schicht oder große Gezeitenamplituden, Einfluss auf die Echos haben bzw. sie sogar verursachen, wird in Kapitel 3 diskutiert. Dort werden dann auch weitere physikalischen Prozesse erörtert und Zusammenhänge zu bereits bestehenden Studien ähnlicher Echos untersucht. Zusammengefasst werden die Ergebnisse dann im 4. Kapitel.

1.1 Grundlagen

1.1.1 Die Atmosphäre der Erde

Die Atmosphäre beschreibt die Gashölle, die die Erde umgibt. Sie setzt sich zu rund 78% aus Stickstoff zusammen. Sauerstoff macht mit rund 21% den zweitgrößten Anteil aus. Argon (0.93%), Kohlendioxid (0.03%) sowie einige weitere Spurengase bilden den Rest. Die Atmosphäre wird in verschiedene Schichten unterteilt. Dabei gibt es eine Vielzahl von Unterscheidungskriterien, um die Atmosphäre in die jeweiligen Schichten zu gliedern. [6]

Das wohl populärste Unterscheidungskriterium beruht auf dem Temperaturgradienten. Hierbei wird die Atmosphäre auf Grund des vertikalen Temperaturverlaufes in Schichten unterteilt (siehe Abbildung 1.1). Im globalen Mittel reicht die Troposphäre

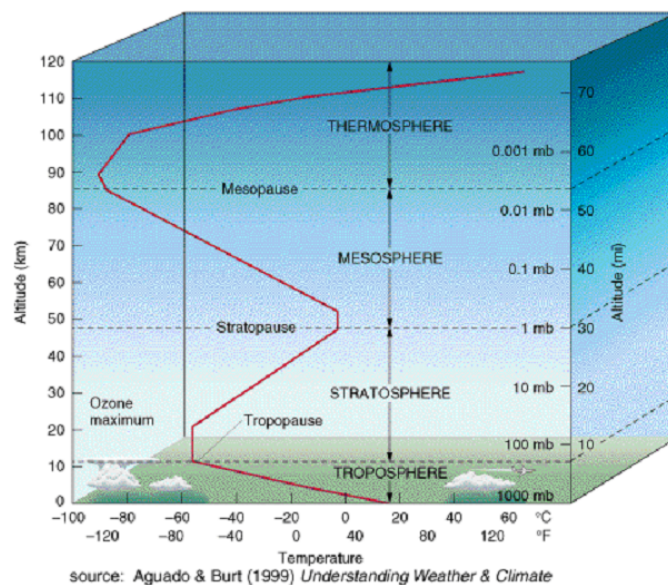


Abbildung 1.1: Aufbau der Atmosphäre. nach <http://www.geographie.uni-muenchen.de/schneider/koeln/proseminar20klimageographie.html>

von 0 bis 12 km Höhe. Hier finden die wichtigen Prozesse für die Entwicklung des Wetters statt. Durch die Rotation der Erde um die gegen die Ekliptik geneigte Achse und die Revolution um die Sonne kommt es zur geografisch und zeitlich variablen Sonneneinstrahlung. Der Großteil der Strahlung wird von der Erdoberfläche absorbiert. Die untere Schicht der Atmosphäre wird dann überwiegend durch Warmluft erwärmt, die von der Erdoberfläche aufsteigt. Gleichzeitig kühlt die Atmosphäre über der sonnenabgewandten Seite der Erde ab. So entstehen Temperatur- und Druckunterschiede, die durch Winde wieder ausgeglichen werden. Diese Temperatur-bzw. Druckausgleiche bringen Folgeerscheinungen, wie Wolken oder Niederschläge, mit sich.

In der Troposphäre nimmt die Temperatur mit steigender Höhe stetig ab. Den Tiefpunkt der Temperatur von ca. -60°C bis -70°C erreicht die Troposphäre im Bereich der Tropopause. Die Tropopause ist die Grenze zwischen Troposphäre und Stratosphäre. Ihre Lage variiert stark in Abhängigkeit von der geografischen Breite und Jahreszeit. Im Äquatorbereich liegt die Tropopause wesentlich höher, als an den Polen. Die Dichte der Atmosphäre nimmt exponentiell mit der Höhe ab. Folglich enthält die Troposphäre den größten Masseanteil mit ca. 80 % der gesamten Atmosphäre. [1]

Oberhalb der Tropopause befindet sich die Stratosphäre. Sie liegt im Bereich von ca. 12-50 km Höhe. In der Stratosphäre steigt die Temperatur wieder an. Das Temperaturmaximum in rund 50 km Höhe ist dabei sehr variabel und befindet sich im Bereich um 0°C . Dieser Bereich wird als Stratopause bezeichnet.

Der Temperaturanstieg folgt aus der hohen Ozonkonzentration in der Stratosphäre.

Das Ozon absorbiert die kurzwellige Strahlung der Sonne.

Da der durch Erwärmung der Troposphäre aufsteigende Wasserdampf in der Tropopause ausfriert, ist die Stratosphäre nahezu masselos. Das Ausfrieren des Wasserdampfes im Bereich der Tropopause und der Temperaturanstieg in der Stratosphäre haben zur Folge, dass selten Vertikalbewegungen stattfinden und daher nur wenig Masse in die Stratosphäre transportiert werden kann. So konzentriert sich 99% der Masse der Atmosphäre in den unteren 30 km. [7]

Die Mesosphäre erstreckt sich im Höhenbereich von 50 bis etwa 100 km. In der Mesosphäre sinkt die Temperatur mit zunehmender Höhe stetig ab. Ihren Tiefpunkt erreicht sie bei etwa -100 bis -150 °C. Der Temperaturtiefpunkt ist stark von der Jahreszeit abhängig. Im Sommer liegt er wesentlich niedriger als im Winter. Der Bereich, in dem die Temperatur ihren Tiefpunkt erreicht, wird als Mesopause bezeichnet. Die Mesopause begrenzt Mesosphäre und Thermosphäre.

Die Thermosphäre erstreckt sich von 85 bis 500 km. Hier steigt die Temperatur nun wieder kontinuierlich an, dabei variiert sie je nach solarer Aktivität sehr stark in einem Bereich von 280-1700 °. Die Thermosphäre liegt in der Ionosphäre, da dort Ionisationsprozesse durch Absorption der UV-, Röntgen-, und radioaktiven Strahlung der Sonne stattfinden.

Der Ionisationsgrad ist ein weiteres Unterscheidungskriterium für die Schichten der Atmosphäre. Demnach wird die Atmosphäre in Neutralatmosphäre, Ionosphäre und Protonosphäre aufgeteilt.

Die Neutralatmosphäre erstreckt sich von 0 bis ca. 80 km Höhe und beinhaltet überwiegend nicht-ionisierte Gase. Oberhalb der 80 km Höhe gibt es kein Ozon, dass die kurzwellige Strahlung der Sonne absorbiert. Durch die kurzwellige solare Strahlung kommt es zur Ionisierung der Gase. Dies geschieht unterschiedlich stark. Es bilden sich Schichten mit verschiedenen Ionisierungsgraden. Man differenziert in D- (80-100 km), E- (rund 100 km) und F- Schicht (F1: 150-250 km, F2: 250-500 km).

Ab einer Höhe von mehr als 500 km beginnt die Exosphäre oder auch Protonosphäre. Dort gibt es nur noch ionisierte Wasserstoffatome. [7]

1.1.2 Die Ionosphäre

Die in dieser Arbeit untersuchten VHF-Radarechos wurden in der E-Schicht der Ionosphäre beobachtet. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen in der Ionosphäre genauer betrachtet.

Die Ionosphäre erstreckt sich in einer Höhe von ungefähr 80-500 km. Sie ist durch Ionisationsprozesse geprägt. Die Gasmoleküle der Luft absorbieren UV-, Röntgen- und radioaktive Strahlung. Sie werden in Elektronen und Ionen aufgespalten.

Luft besteht zum Großteil aus Stickstoff und molekularem Sauerstoff, ab einer Höhe von 200 km enthält sie auch atomaren Sauerstoff. Ab einer Höhe von 600 km besteht die Luft fast nur noch aus Helium und Wasserstoff. [9]

Durch die Ionisation der Gasmoleküle in der Luft, wird sie elektrisch leitend. Radiowellen können reflektiert werden. Dies gilt nur für einen Frequenzbereich von 5 bis 10 MHz. Bei größeren Frequenzen werden die Radiowellen transmittiert.

Gleichung (1.1) stellt den Brechungsindex für elektromagnetische Wellen in einem Plasma ohne Magnetfeld und ohne Wechselwirkungen wie z.B. Stöße dar.

$$n^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (1.1)$$

Hierbei ist ω_p die Plasma Frequenz und ω die Frequenz einer elektromagnetischen Welle. Sind ω_p und ω gleich, so wird $n^2 = 0$ und es liegt Totalreflexion vor. Ist die Frequenz der elektromagnetischen Welle größer als die Plasmafrequenz, breitet sich die elektromagnetische Welle aus. Die Plasmafrequenz ist folgendermaßen definiert:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{\epsilon_0 \cdot m_e}} \rightarrow f_p = \sqrt{\frac{e^2}{\epsilon_0 m_e}} \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{N_e} \quad (1.2)$$

Hierbei steht e für die Elementarladung und m_e für die Masse eines Elektrons. Die elektrische Feldkonstante wird durch ϵ_0 angegeben und N_e steht für die Anzahl der Elektronen pro Kubikcentimeter. Nimmt man nun für N_e eine typisch maximale Elektronendichte von rund $10^6 \frac{1}{\text{cm}^3}$ an, so ergibt sich eine Grenzfrequenz von etwa 9 MHz. So lange die Frequenz der elektromagnetischen Welle kleiner oder gleich dieser 9 MHz ist, wird sie reflektiert. Darüber hinaus wird sie transmittiert. [10]

Die Ionosphäre wird in Schichten eingeteilt. Die Differenzierung der Schichten resul-

tiert dabei aus dem vertikalen Elektronendichteverlauf.

Im Jahre 1901 bewies Guglielmo Marconi, dass es in rund 100 km Höhe eine elektrisch leitende Schicht gibt. Sir Edward Appleton bezeichnete diese 1927 als E(lektrische)-Schicht. In den darauffolgenden Jahren wurden weitere Schichten unter und über der E-Schicht entdeckt; die D- und die F-Schicht. Die D-Schicht liegt unterhalb der E-Schicht, in ca. 60 bis 90/95 km Höhe.

Die Ionisationsprozesse in der D-Schicht rühren zum Großteil von der Fotoionisation vom Stickstoffmonoxid, durch Lyman α -Strahlung mit einer Wellenlänge von 121.6 nm, her. Da die D-Schicht eine noch sehr hohe Gasdichte aufweist, sind die dissoziativen Rekombinationen sehr effizient. So existiert die D-Schicht nur unter Einwirkung von Sonneneinstrahlung. In der Nacht baut sie sich vollständig ab. [11]

Im Bereich von 95-130 km liegt die E-Schicht. Dort wird hauptsächlich molekularer und atomarer Sauerstoff und Stickstoff ionisiert. Dies geschieht vor allem durch Röntgen- und β -Lyman-Strahlung.

Neben Sauerstoff- und Stickstoffionen sind weitere Ionen, wie z.B. Fe^+ , Mg^+ , Si^+ und Ca^+ , in der E-Schicht vorhanden. Deren Existenz lässt sich durch die Abspaltung von Meteoriten begründen. [9]

Innerhalb der E-Schicht bilden sich sporadisch eng begrenzte Zonen hoher Ionisation aus. Dort können auch Signale mit Frequenzen um die 50 MHz, teilweise sogar über 100 MHz, reflektiert werden. Diese Zonen werden als sporadische E-Schichten bezeichnet.

Im Laufe dieser Arbeit sollen diese sporadischen E-Schichten genauer bezüglich Auftreten, Entstehung und weiteren Eigenschaften untersucht werden. Dabei liegt das Hauptaugenmerk auf den sporadischen E-Schichten der mittleren Breiten. (siehe Kapitel 'Sporadische E-Schichten')

Oberhalb der E-Schicht liegt die F-Schicht. Sie erstreckt sich von 130 bis 500 km und wird in 2 Unterschichten aufgeteilt; die F1-Schicht (130- 250 km) und F2-Schicht (250- 500km). Kennzeichnend für die F-Schicht, ist die Ionisation von molekularem Stickstoff und atomarem Sauerstoff durch sehr kurzwellige Strahlung, wie z.B. die sehr energiereiche UV-Strahlung. Da der atmosphärische Dichteverlauf durch eine Abnahme mit steigender Höhe gekennzeichnet ist, herrscht im Bereich der F-Schicht eine sehr geringe Dichte. Im Vergleich zur D-Schicht, nehmen die Rekombinationsprozesse der

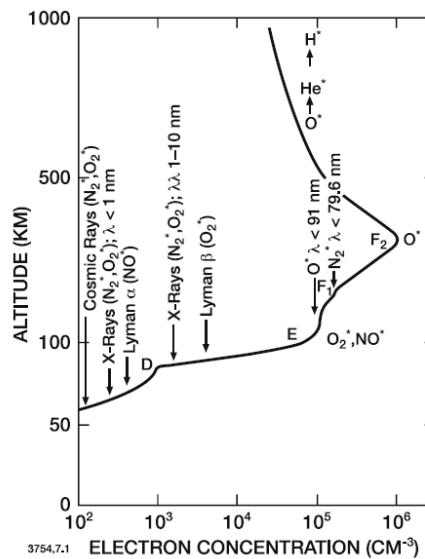


Abbildung 1.2: Schichten der Ionosphäre. nach Brasseur, Guy P. and Solomon, Susan: *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*; Springer e-books; 2005.

dort befindlichen Ionen eine relativ große Zeit in Anspruch. [9]

In Abbildung 1.2 sind die verschiedenen Schichten der Ionosphäre nach Höhe und Elektronendichte dargestellt. In der Abbildung ist gut zu erkennen, dass die F2-Schicht ein Maximum in der Elektronendichte von $10^6 \frac{1}{\text{cm}^3}$ hat. Die hohe Elektronendichte innerhalb der F2-Schicht resultiert aus der geringen Gasdichte in diesem Höhenbereich. Freie Elektronen benötigen hier sehr lange zur Rekombination. Die darunterliegenden D, E und F1 Schichten haben ihr Elektronendichtemaximum immer beim Sonnenhöchststand. Da in diesen Schichten die Gasdichte höher ist als innerhalb der F2-Schicht, überwiegt nachts die Rekombination. Die Schichten werden stark geschwächt und können sich auch vollständig abbauen. Nur die F2-Schicht, die sich in großen Höhen (300km- 400km) befindet, bleibt über Nacht bestehen. Grund hierfür ist die niedrige Gasdichte und die daraus resultierende lange Dauer der Rekombination, so dass sich nicht alle Elektronen bis zum Tagesanbruch mit einem Ion zu einem neutralen Atom zusammengeschlossen haben. [4]

1.1.3 Die sporadische E-Schicht

Ein interessantes Phänomen der unteren Ionosphäre ist das Auftreten von sporadischen E-Schichten. Die Wellenausbreitung in der Ionosphäre kann durch sporadische

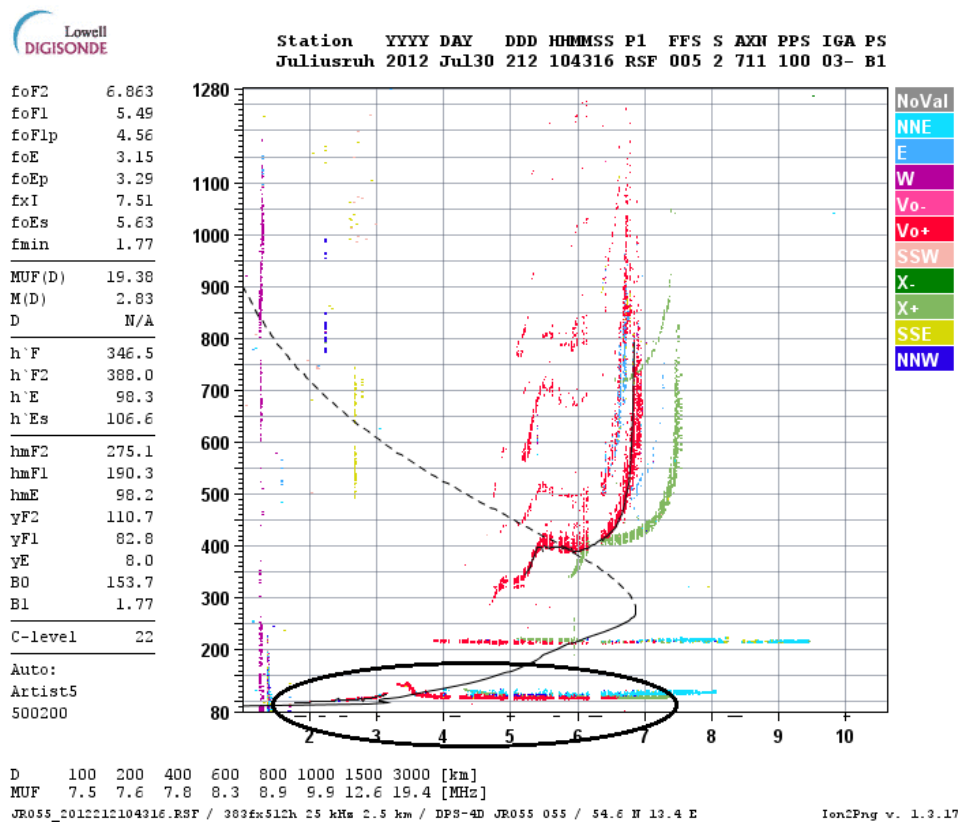


Abbildung 1.3: sporadische E-Schicht. Messungen der Ionosonde in Juliusruh vom 30.07.2012

E-Schichten erheblich beeinflusst werden. [4] In dieser Arbeit werden VHF-Radar Echos in der E-Schicht der Ionosphäre untersucht. Da in Erwägung gezogen wird, dass die Echos Reflexionen an der sporadischen E-Schicht sind, folgt nun eine Erläuterung der sporadischen E-Schichten.

Sporadische E-Schichten sind eng begrenzte Gebiete hoher Elektronendichte. Sie treten im Höhenbereich von 90-150 km auf. Sporadische E-Schichten treten nicht kontinuierlich auf.

Charakteristisch für sporadische E-Schichten ist ihre starke Lokalisierung. Meist erstrecken sie sich nicht weiter als einige Kilometer. Die Form der sporadischen E-Schichten kann variieren. Manchmal nehmen sie eine eher ebene und gleichmäßige Form an, andererseits können sie auch in wolkenähnlicher Form auftreten. [4] In der Abbildung 1.3 ist eine sporadischen E-Schicht dargestellt, die mit der Ionosonde in Juliusruh aufgezeichnet wurde (eingekreist).

Seit ihrer Entdeckung in den 1930'er Jahren durch Appleton und Naismith versuchen Wissenschaftler die sporadischen E-Schichten und besonders deren Entstehung genau zu verstehen. Sie treten in allen Breiten auf, wobei sie über den mittleren Breiten be-

sonders ausgeprägt sind. [13]

Whitehead war einer der ersten Wissenschaftler, der einen Zusammenhang zwischen dem Auftreten der sporadischen E-Schichten in den mittleren Breiten und den gezeitenabhängigen Windscherungen der horizontalen Windkomponente vermutete. [5]

Diese Vermutung wurde 2009 von Arras untermauert. Mit Hilfe von globalen Satellitenmessungen wurde bewiesen, dass eine maximale sporadische E-Schicht zu erwarten ist, wenn die Scherung des zonalen Windes negativ ist. Die Windscherung wird dabei durch die halbtägige Gezeit in den mittleren Breiten verursacht. [12] Dieser Prozess ist dabei ebenso wesentlich für die Ausbildung von sporadischen E-Schichten wie die Abspaltung der Metallionen von Meteoriten. Metallionen haben eine sehr lange Rekombinationszeit und so wird ermöglicht, dass die sporadische E-Schicht genügend Zeit hat, sich auszubilden. Der sogenannte 'Windshear-Mechanismus' beinhaltet, dass die Metallionen am Knotenpunkt zwischen Windscherung des vertikalen und des horizontalen Windes, in eine dünne Schicht zusammen geführt werden.[16]

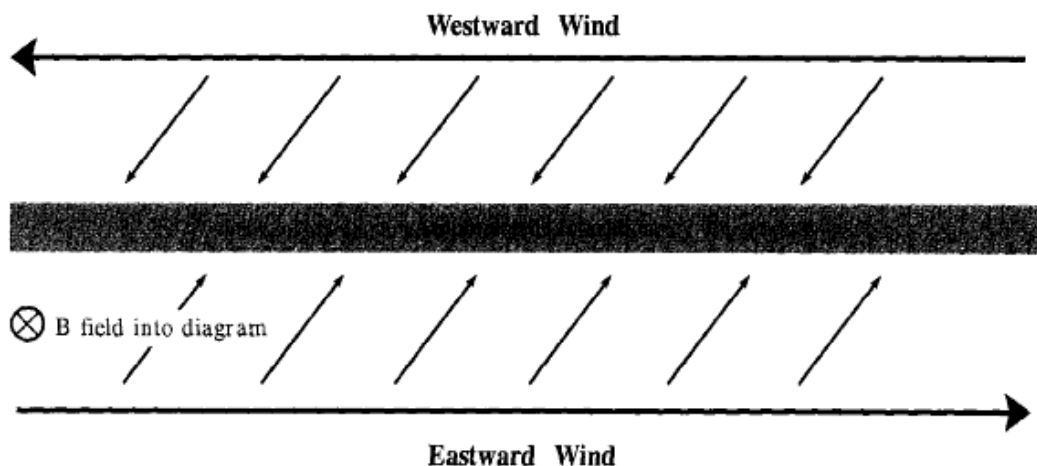


Abbildung 1.4: windshear mechanism. nach J. D. Mathews: *Sporadic E: current views and recent progress*; Communications and Space Sciences Laboratory 316 EE East; The Pennsylvania State University; J. Atmos;

Detailliert läuft der 'Windshear-Mechanismus' folgendermaßen ab:

Im Bereich der E-Schicht ist die Plasmadichte um rund eine Million mal kleiner als die Dichte des neutralen Gases. Die schweren Metallionen erfahren die Lorentzkraft, die aus dem Erdmagnetfeld und der Geschwindigkeit des horizontalen, neutralen Windes resultiert. Die Lorentzkraft zwingt sie zu einer vertikalen Driftbewegung. Die leichten Elektronen hingegen werden nun schon vom Erdmagnetfeld so stark beeinflusst, dass

sie den magnetischen Feldlinien folgen und auf eine Höhe von etwa 70 km absinken. In dieser Höhenregion hat das Magnetfeld noch keinen so starken Einfluss wie in den größeren Höhen. Die Elektronen bewegen sich nun als Reaktion auf polarisierende E-Felder, mit den Ionen wieder aufwärts. Metallionen und Elektronen vollziehen so lange eine Aufwärtsbewegung, bis sich in einer Höhe von ungefähr 100 km der Grad der zonalen Windscherrung dreht. Die Aufwärtsbewegung wird gestoppt. Metallionen und Elektronen werden im Bereich des Wendepunktes zu einer Schicht zusammengedrückt (siehe Abb. 1.4). Es entsteht die sporadische E-Schicht.[15], [14]

1.1.4 Das Radar

Das Radar ist ein Messgerät, dass mittels Aussendung und Empfang von elektromagnetischen Wellen Auskunft über entfernte Objekte liefern kann. Der Begriff 'Radar' steht für 'Radio detection and Ranging'.

Es gibt diverse Arten von Radars, die sich technisch und daraus folgend im Einsatzgebiet unterscheiden. In Abbildung 1.5 ist eine Einteilung nach den technischen Unterscheidungskriterien dargestellt. [17]

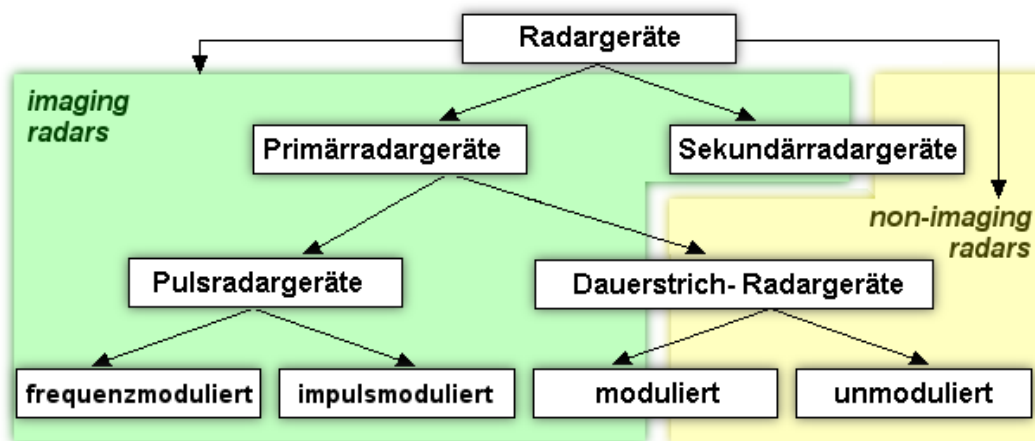


Abbildung 1.5: technische Unterscheidungskriterien des Radars.
nach <http://www.radartutorial.eu/druck/Buch2.pdf>

Das Radar wird in dieser Unterteilung in 2 Hauptgruppen aufgeteilt: das Primärradar und das Sekunderradar.

Da in dieser Arbeit Echos ausgewertet werden, die von passiven Objekten stammen,

wird die Funktionsweise des Primärradars näher erläutert.

Das Primärradar ist dadurch gekennzeichnet, dass es mit passiven Echos arbeitet. Das vom Primärradar gesendete Signal, wird vom Zielobjekt reflektiert und dann vom Radar wieder empfangen.

In der Abbildung 1.5 ist zu erkennen, dass ein Primärradar nochmals in Pulsradar oder Dauerstrichradar unterteilt wird.

Das Pulsradar besitzt einen Sender und Empfänger sowie einen Duplexer. Der Duplexer schaltet periodisch zwischen 'Senden' und 'Empfangen'. Dies geschieht impulsförmig. In der Sendeperiode kann also ein Signal gesendet bzw. in der Empfangsperiode empfangen werden.

Mit dem Impulsradar kann über die Laufzeit und Ausrichtung des Radars die Entfernung und die Richtung des Objektes bestimmt werden. Die Messentfernung des Radars ist begrenzt, da das Pulsradar periodisch zwischen 'Senden' und 'Empfangen' wechselt. Die maximale Messentfernung lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$R_{max} = \frac{c_0 * (PRT - P_W)}{2} \quad (1.3)$$

Hierbei steht c_0 für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($\sim 3 * 10^8 m/s$), PRT ist die Impulsfolge und P_W ist die Impulsweite. Die minimale Messentfernung lässt sich mit Gleichung (6) berechnen:

$$R_{min} = \frac{c_0 * (\tau + t_{recovery})}{2} \quad (1.4)$$

Die minimale Messentfernung gibt an, wie weit das Zielobjekt mindestens von der Antenne entfernt sein muss, um registriert zu werden. Dazu sollte die Sendezeit τ möglichst kurz sein, damit der Sendeimpuls die Antenne in diesen Zeitraum vollständig verlassen kann. Außerdem muss der Duplexer noch ausreichend Zeit haben, um auf 'Empfangen' umzuschalten. Die Umschaltzeit oder auch Erholzeit wird hier in der Formel als $t_{recovery}$ bezeichnet. Aus den Gleichungen wird ersichtlich, dass sich die Messentfernung an der Dauer der Empfangszeit orientiert. Treffen die reflektierten Signale erst nach der Empfangszeit ein, so werden sie nicht registriert. Es kann auch zu einer Verfälschung der Messungen kommen, wenn die Signale erst während der darauffolgenden Empfangsperiode eintreffen.[18].



Abbildung 1.6: Maarsy-Radar in Andøya (Phased Array Antenna). nach rezn8d.com (MAARSY. Andøya, Norway 800 kW - 53.5MHz)

Über Abstrahlwinkel und Dauer der Empfangszeit erhält man Informationen über die Koordinaten des Zieles. Mit Hilfe eines Radars lassen sich auch die Power, die Dopplerverschiebung und die Dopplerbreite bestimmen. Power gibt die Signalstärke an und drückt somit die Reflektivität des Zieles aus. Daraus lassen sich Eigenschaften wie z.B. Elektronendichte ableiten. Mit Hilfe der Dopplerverschiebung kann man darauf schließen, ob und wie schnell sich das Ziel bewegt. Bezogen auf die VHF-Radarechos kann somit die Geschwindigkeit des Windes bestimmt werden, der die Elektronen beeinflusst. Wie stark die Bewegung variiert, wird mit Hilfe der Dopplerbreite ermittelt. Aus einer großen Dopplerbreite lässt sich z.B. auf Turbulenzen in dem Höhenbereich schließen.

Die Antenne

Es gibt 2 bevorzugte Bauarten von Antennen des Radars. Man unterscheidet zwischen einer einzelnen 'Schüssel' bzw. 'dish' und dem Antennenfeld bzw. 'array'. Letzteres ist in Abbildung 1.6 dargestellt.

Welche dieser Bauart bevorzugt wird, hängt von den Anforderungen an das Radar und dessen Parameter ab (Frequenz, Leistung, Empfindlichkeit, Schwenkbereich (beam spread)). Will man im UHF-Bereich arbeiten, bietet sich die Radarschüssel an. Im VHF-Bereich ist das 'Phased Array' von Vorteil. Eine Radarschüssel hat einen sehr engen Schwenkbereich, welcher nur langsam abgefahren werden kann. Das 'Phased Array' dagegen kann über Phasensteuerung schnell schwenken und hat zudem einen großen Schwenkbereich. [19]

Bandbreite eines Radars

Die Frequenz, mit der ein Radar arbeitet, ist entscheidend dafür, in welchem Höhenbereich man die besten Signale empfängt. Das MST-Radar arbeitet zum Beispiel im VHF-Bereich. In der Tabelle 1.1 werden die Frequenzbereiche und die dazugehörigen Höhenregionen übersichtlich dargestellt.[19]

Das Ostsee-Wind-Radar - OSWIN

Im Laufe der Arbeit sollen VHF-Radar Echos in der Ionosphäre gemessen und analysiert werden. Die Messungen werden mit Hilfe des 'Ostsee-Wind-Radars', kurz auch 'OSWIN' genannt, durchgeführt.

Das OSWIN ist ein VHF-Radar, das seit 1999 in Kühlungsborn in Betrieb ist. Mit ihm können Höhenprofile des 3-D Windvektors und der Radarreflektivität bestimmt werden. Das OSWIN arbeitet im kontinuierlichen Betrieb. Dabei muss dieser nicht beaufsichtigt werden. Mithilfe der Spaced-Antenna (SA) und der Doppler-Beam-Swinging (DBS) Methode können die jeweiligen Höhenprofile bestimmt werden.

Bei der Spaced-Antenna Methode wird die horizontale Bewegung von rückstreuenden Irregularitäten in der Atmosphäre ermittelt. Dazu wird anhand von 3 Antennen, die am Boden räumlich verteilt sind, die Bewegung ihrer Interferenzmuster gemessen.

Bei der Doppler-Beam-Swinging Methode wird der Radarstrahl in regelmäßigen zeitlichen Abständen in verschiedene Richtungen geschwenkt. Aus der Dopplerverschiebung der Empfangssignale kann man dann die radialen Windgeschwindigkeiten in Schwenkrichtung und durch Kombination schließlich den 3D-Wind bestimmen.[20]

Der Aufbau des OSWIN's wird auf der Website des Leibniz-Institut für Atmosphärenphysik (<http://www.iap-kborn.de/OSWIN-VHF-Radar.176.0.html>) wie folgt beschrieben:

"Das OSWIN-Radar besteht aus einem Sende-Empfangs-Antennen Array, welches sich aus 144 Vier-Elemente-Yagi-Antennen zusammensetzt. Diese sind in Subsystemen aus 4 Antennen quadratisch in einer 6x6 Matrix angeordnet. Die Einzelantennen haben einen Abstand von $\frac{\lambda}{\sqrt{2}}$ zueinander und sind im Winkel von 45° zur Nord-Süd-Achse ausgerichtet. So wird ermöglicht, dass im DBS-Mode in zonaler (Ost-West) und meridionaler (Nord-Süd) Richtung eine identische Antennencharakteristik genutzt werden kann. Im SA-Mode ist das Antennenfeld im Empfangsfall in sechs Einzelfelder zu je 6 Subsystemen aufgeteilt, die maximal sechs Empfangskanälen zugeordnet werden kön-

nen. Im DBS-Mode ist es möglich, die Antennenkeule in jeweils drei Zenitwinkeln (7° , 13° , 20°) in die vier Himmelsrichtungen zu schwenken. Dieses wird im Sendebetrieb durch phasenverzögerte Einspeisung der sechs Antennenzeilen oder -spalten und im Empfangsbetrieb durch softwaregestütztes Postbeam-Steering (PBS) realisiert.

Das Empfangssystem des OSWIN besteht aus sechs Kanälen. Dort werden die Signale in ihre Quadraturkomponenten vorverarbeitet. Die Analyse der Rohdaten kann in Echtzeit oder als Postprozeß auf dem integrierten Host-PC oder auf jedem mit dem Internet verbundenen Rechner durchgeführt werden."

Das OSWIN-Radar wird auf einer Frequenz von 53,5 MHz betrieben. Die Spitzenleistung des OSWIN beträgt 90 kW und dessen Impulslänge 1 bis 32 μs . Im Höhenbereich von 65 bis 120 km erfolgen die Messungen mit einer Zeitauflösung von etwa einer Minute. Die Höhenauflösung kann dabei zwischen 150 m, 300 m, 600 m oder 1000 m gewählt werden.[28]

Radar Method	Frequency	Wavelength [m]	Power [kW]	Antenna Dimension in Wavelength	Heigth Region
MF Radar	MF-HF	150-50	0.01-1	1-10	M/LT/IO
HF Radar Ionosonde	HF	300-10	0.01-5	0.5-1	Th/Io
Coherent Scatter	HF-VHF	30-1	0.1-1	5-50	Th/Io
Meteor Radar	HF-VHF	10-6	0.1-80	2-10	M/LT
MST Radar	VHF	5-7	1-1000	5-50	M/S/T
ICS Radar	VHF-UHF	6-0.25	100-300	100-300	M/LT/IO
ST-Radar	VHF-SHF	6-0.1	1-500	10-500	S/T
BL-Radar	UHF	0.3	0.01-0.1	10	T

Tabelle 1.1: Bandbreiten der verschiedenen Radararten. nach Vorlesungsskript Atmosphärenphysik; 10. Semester; Uni Rostock; 2012.

MF = 0.3-3.0 MHz
HF = 3.0-30 MHz
VHF = 30-300 MHz
UHF = 300-3000 MHz
SHF = 3-30 GHz
EHF = 30-300 GHz
LF = 30-300kHz
VLF = 3-30 kHz

M-Mesosphäre
S-Stratosphäre
T-Troposphäre
LT-Lower Troposphäre
Th/Io-Thermosphäre/Ionosphäre

Kapitel 2

Datenmaterial und Messungen

2.1 Beobachtungen

Mit dem OSWIN-Radar wurden unter anderem kontinuierliche Beobachtungen in der E-Schicht im Höhenbereich von 95-116 km durchgeführt. Es wurden die Radarefektivität und die radialen Windgeschwindigkeiten gemessen. In dieser Arbeit werden Messungen ausgewertet, die seit Mai 2009 kontinuierlich durchgeführt wurden. Die Messungen mit dem OSWIN-Radar wurden unter folgenden technischen Parametern durchgeführt:

- ein Abstrahlwinkel von 0°
- eine 3 dB Strahlbreite von 6°
- eine Frequenz von 53,5 MHz
- eine Spitzenleistung von 90 kW
- die Zeitauflösung schwankte zwischen 1 bis 2 Minuten
- die Höhenauflösung betrug: 300 m

Es wurde ein Abstrahlwinkel von 0° gewählt, da hauptsächlich Echos beobachtet wurden als das Radar vertikal ausgerichtet war. Dies weist auf eine hohe Aspektempfindlichkeit hin. Als maximale Messhöhe wurden 116 km festgelegt. Im Laufe der Messdatenanalyse stellt sich jedoch heraus, dass die VHF-Radarechos auch über die 116 km hinaus auftreten können. In zukünftigen Messungen muss die Maximalhöhe demnach erweitert werden.

Die Abbildung 2.1 stellt 3 Beispiele für die beobachteten VHF-Radarechos aus der E-Schicht dar. Diese erschienen am 25. Mai 2010 zwischen 21:35 und 22:20 Uhr, 31. Mai 2010 zwischen 19:25 und 19:40 Uhr und am 07. Juni 2010 zwischen 19:30 und 20:00. Die Stärke des auf Höhe und Zeit aufgetragenen Signal to Noise Ratio (SNR), ist mit Hilfe der farblichen Skala am Rand zu entnehmen.

Laut Lübken kann es ausgeschlossen werden, dass es sich bei diesen Echos um PMSE (Polar Mesospheric Summer Echoes) handelt. In diesem Höhenbereich beträgt die Durchschnittstemperatur 196 K und ist somit rund 46 K zu warm, um das Vorhandensein von Eispartikeln zu ermöglichen. Diese sind allerdings Hauptursache der PMSE [22].

Die drei hier beschriebenen Echos wurden in einem Höhenbereich von 104 bis 116 km gemessen. Der Abbildung 2.1 kann man entnehmen, dass sie eine sehr begrenzte vertikale Ausdehnung haben. Diese überragt meistens nicht mehr als 300 Meter. Besonders am Beispiel vom 25. Mai 2010 lässt sich erkennen, dass die Echos mit der Zeit schnell ihre Höhe ändern. Sie sind sehr dynamisch, dabei beträgt die Dopplergeschwindigkeit bei der Auf- und Abwärtsbewegung ca. $\pm 1 - 2$ m/s.

2.2 Statistische Eigenschaften

Die statistischen Eigenschaften der VHF-Radarechos wurden mit Hilfe von MATLAB-Programmen ermittelt. Die Verarbeitung der Messwerte geschah ebenfalls unter Anwendung von MATLAB-Programmen.

Um ein Echo deutlich vom Rauschen zu unterscheiden, wurde eine Schranke von $\text{SNR} \geq -15$ dB gewählt. Nur Echos oberhalb dieser Schranke wurden untersucht. In der Abbildung 2.2 ist dargestellt, wie sich die Häufigkeit der Echos im Bezug zum SNR verhält. Hier ist zu sehen, dass die Mehrzahl der Echos ein SNR von weniger als 0 dB vorweisen. Das bedeutet, dass die empfangene Nutzsignalleistung meistens kleiner ist als die empfangene Rauschleistung. Echos mit sehr starken Signalen über 5 dB treten selten auf.

Im weiteren soll die saisonale Verteilung der Echos überprüft werden. Abbildung 2.3 zeigt die relative Häufigkeit der Echos als Funktion vom Monat. In der Abbildung ist deutlich zu erkennen, dass die Echos vor allem in den Frühlings- bzw. Sommermonaten nachgewiesen wurden. Das Auftreten der Echos konzentriert sich mit etwa 80 %

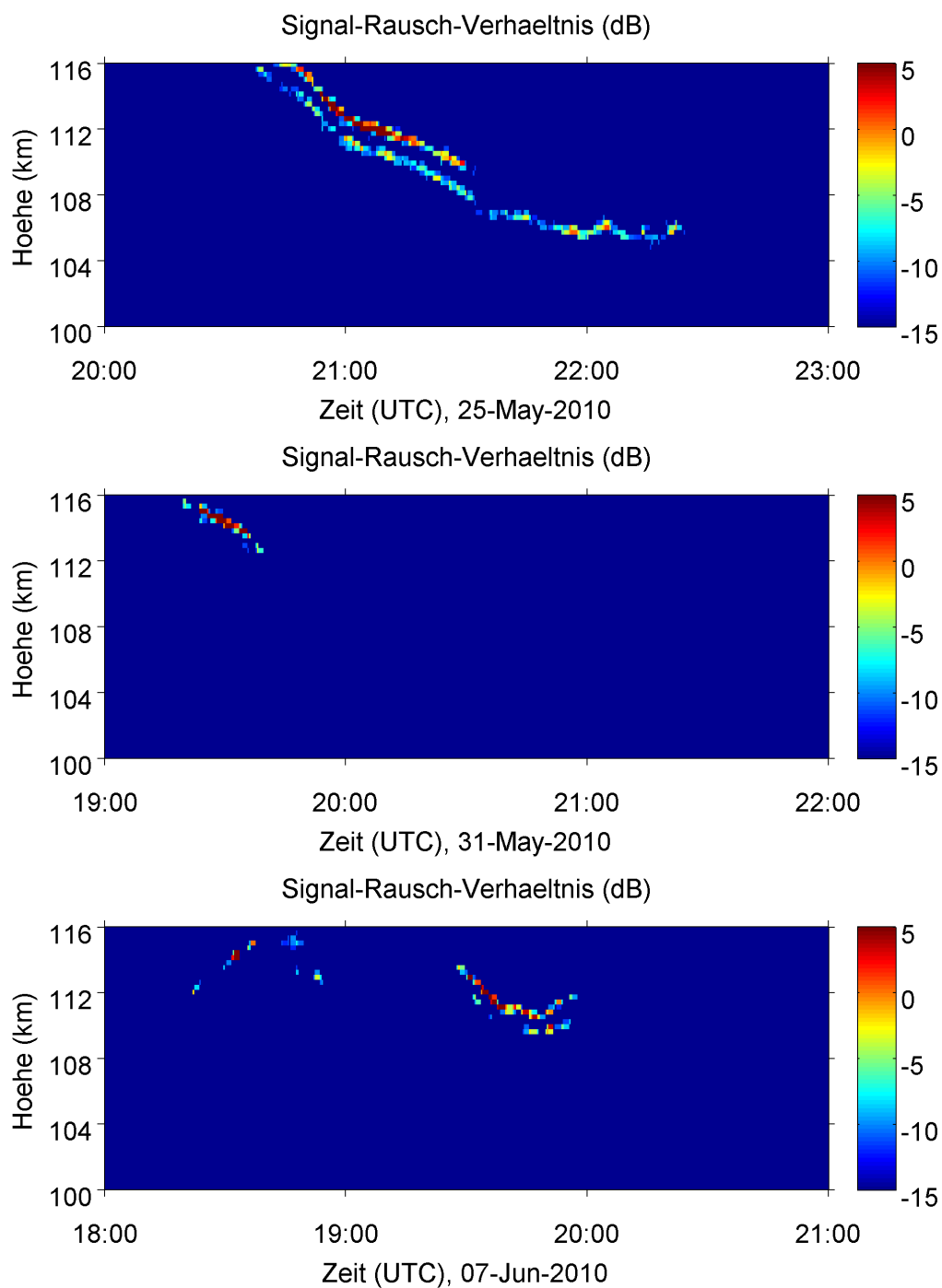


Abbildung 2.1: Beispiele der beobachteten VHF-Radarechos

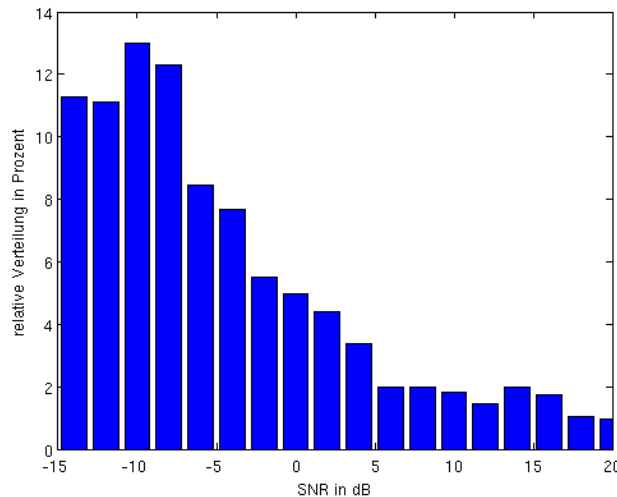


Abbildung 2.2: Häufigkeitsverteilung von Signal to Noise Ratio

auf die Monate Mai, Juni und Juli. Das absolute Maximum tritt gegen Ende Mai und Anfang Juni auf. Das vermehrte Auftreten von Echos gegen Ende Dezember und Anfang Januar ist auffällig. Vergleichbare Beobachtungen mit dem VHF-Radar ALWIN in Andenes ergaben eine sehr ähnliche saisonale Verteilung, die auch den interessanten Peak um Dezember und Januar herum verzeichnen konnten.

Interessant ist, dass im Jahr 2011 nur Echos in den Sommermonaten beobachtet wurden. Im Jahr 2010 hingegen wurden auch Echos im Januar registriert. Am meisten Echos wurden, mit einer Gesamtdetektionszeit von 602 Minuten, im Jahr 2009 beobachtet. 2009 wurden auch Echos in den Wintermonaten November und Dezember registriert.

Neben der saisonalen Verteilung der Echos der sporadischen E-Schicht wird nun untersucht, ob ihr Auftreten einem Muster bezüglich der Tageszeit unterliegt. In Abbildung 2.4 ist nun die tageszeitliche Verteilung grafisch dargestellt. Deutlich ist zu erkennen, dass die Echos vor allem in den Abendstunden (18:00-23:00 Uhr), vereinzelt auch in den frühen Morgenstunden (02:00-06:00) und sehr selten am Tag (10:00-16:00) auftreten. Es fällt auf, dass Echos, die am frühen Morgen und nachts auftreten, in Höhen über 100 km zu beobachten sind. Die wenigen Echos die tagsüber detektiert wurden, treten schon in Höhen zwischen 95 und 100 km auf.

Als nächstes wird die Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Höhe für die Jahre 2009, 2010 und 2011 betrachtet. Dabei steht nun jeder Graph der Abbildung 2.5

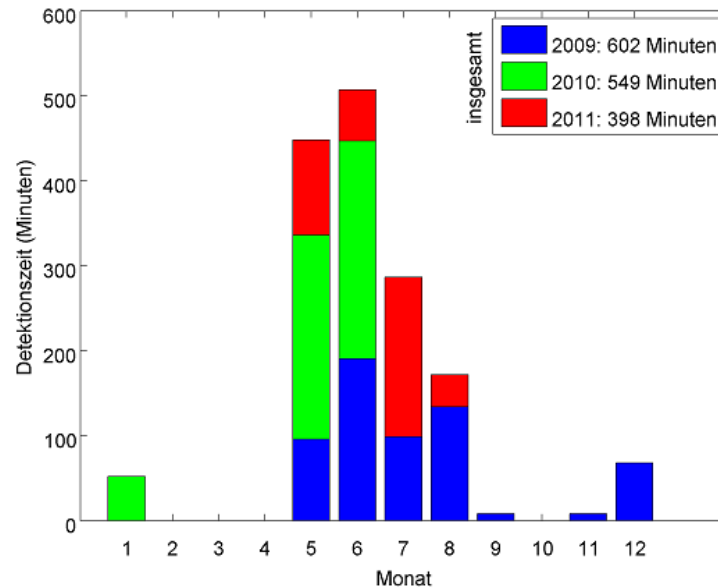


Abbildung 2.3: saisonale Verteilung

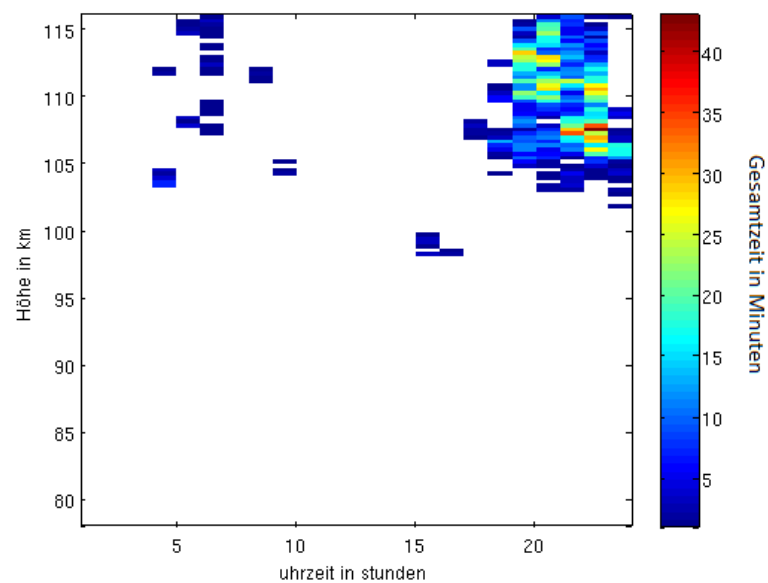


Abbildung 2.4: Häufigkeitsverteilung am Tag

für ein Jahr (blau-2009, grün-2010, rot-2011). In dieser Abbildung sind die Gesamtzeiten, die Echos detektiert wurden, auf die Höhe aufgetragen. Aus den Gesamtzeiten lässt sich auf die Häufigkeitsverteilung schließen. Im Höhenbereich zwischen 106 und 108 km, wie auch von 110 bis 112 km sind deutlich Peaks zuerkennen. Ab 116 km Höhe steigt die Häufigkeit der Echos wieder an. Die maximale Messentfernung des OSWIN-Radars ist nur auf 116 km eingestellt. Für zukünftige Messungen sollte man in

Erwägung ziehen, sie zu erweitern.

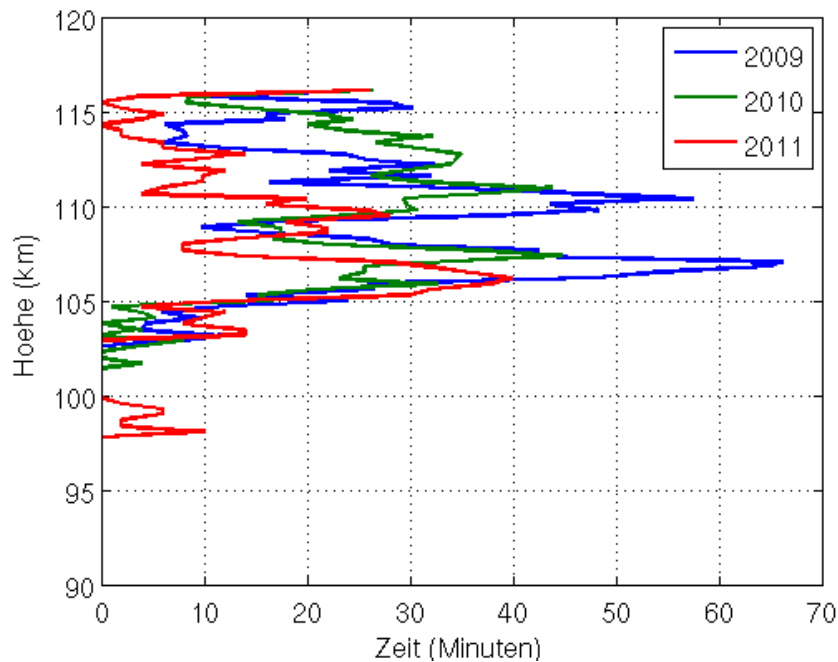


Abbildung 2.5: Höhenverteilung der einzelnen 3 Jahre

Die Abbildung 2.5 zeigt, dass es zwischen den Jahren jeweils Unterschiede gibt. 2009 weist dabei das größte Auftreten von Echos auf. Nachfolgend nimmt die Häufigkeit der Echos von Jahr zu Jahr ab. 2011 erreicht das maximale Auftreten nur etwas mehr als die Hälfte des Maximums von 2009. Auch wenn die Häufigkeit der Echos mit den Jahren abgenommen hat, hat sich die Höhenverteilung nicht signifikant verändert. Bis auf ein zusätzliches lokales Maximum im Jahr 2011 im Höhenbereich von 98 bis 100 km ist die Struktur der Häufigkeitsverteilung sehr ähnlich geblieben. Es ist auffällig, dass die maximale Häufigkeit der Echos in den beobachteten drei Jahren sich in den niedrigeren Höhenbereich verschoben hat.

Nachfolgend werden die zeitliche und die vertikale Ausdehnung der Echos ausgewertet. In Abbildung 2.6 ist die Anzahl der Echos als Funktion der Dauer in Minuten dargestellt. Es ist gut ersichtlich, dass die Mehrzahl der Echos eine Dauer von 0 bis 50 min haben. Etwa die Hälfte der Echos haben eine Dauer von 0 bis 15 min. Längere Echos mit einer Dauer von 15 bis 50 min treten mit einer Häufigkeit von etwa 40 % auf. Vereinzelt kommen Echos vor, die 70 bis 105 min andauern. Die Häufigkeitsver-

teilung der Echos in Bezug zu deren Dauer, variiert stark von Jahr zu Jahr.

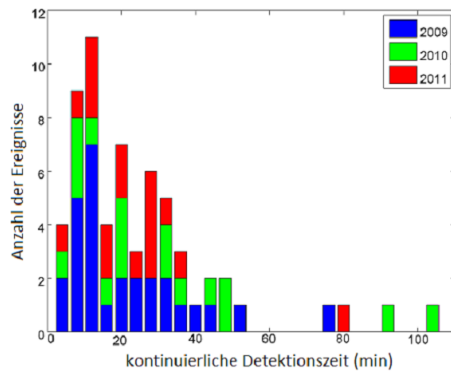


Abbildung 2.6: Dauer in Minuten

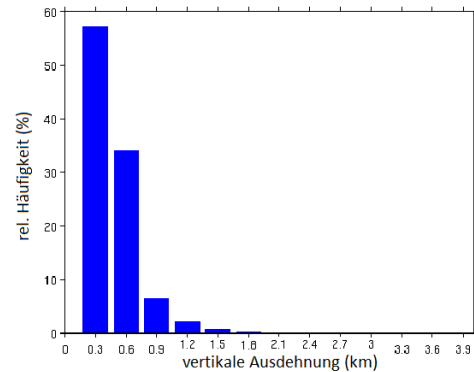


Abbildung 2.7: vertikale Ausdehnung

Abbildung 2.7 zeigt, mit welcher Häufigkeit Echos als Funktion der vertikalen Ausdehnung auftreten. Echos können sich in einem Bereich von 300 m bis 1800 m vertikal ausdehnen. Echos, die sich über 300 m erstrecken, treten am häufigsten auf. Dabei muss beachtet werden, dass die Höhenauflösung 300 m betrug und demzufolge auch Echos mit einer geringeren Dicke in dieser Klasse enthalten sind. Dann nimmt die Häufigkeitsverteilung bis zu den 1800 m rapide ab.

Zusätzlich wurde auch die Häufigkeitsverteilung der spektralen Breite aufgetragen (Abbildung 2.8). Die spektrale Breite ist ein Maß für die Variabilität der Geschwindigkeit und kann auf Turbulenzen hinweisen. In diesem Fall wurden spektrale Breiten in einem Bereich von 0 bis 6 m/s gemessen. Innerhalb dieses Bereiches entfallen fast die Hälfte der spektralen Breiten auf den sehr begrenzten Bereich von 0 bis 1 m/s. Der Rest verteilt sich auf die darauf folgenden spektralen Breiten, wobei ein abfallender Trend zu beobachten ist. Zum Zeitpunkt der Echos wirkten demnach keine starken Turbulenzen. In Abbildung 2.9 ist die relative Häufigkeit als Funktion der radialen Windgeschwindigkeit der Echos aufgetragen. Ein symmetrischer Verlauf ist zu erkennen, wobei Geschwindigkeiten von ± 1 -2 m/s am häufigsten sind.

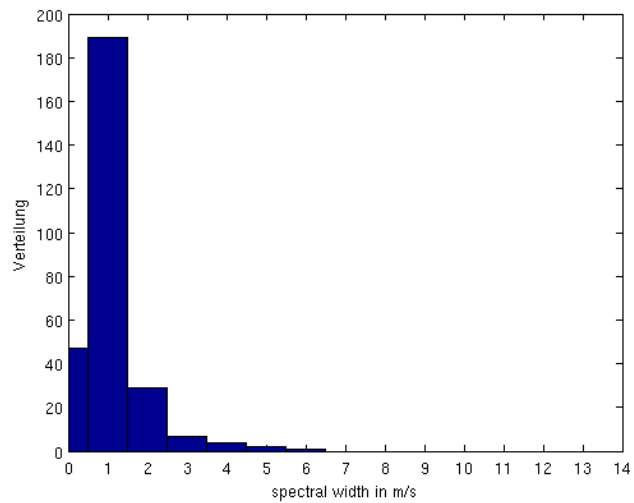


Abbildung 2.8: spektrale Breite

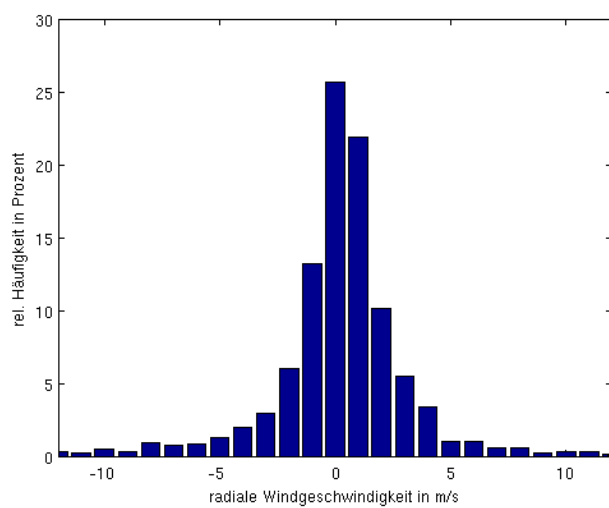


Abbildung 2.9: radiale Geschwindigkeit

Kapitel 3

Diskussion

Nachdem nun Beobachtungen und statistische Eigenschaften beschrieben wurden, sollen diese nun mit physikalischen Prozessen in Verbindung gebracht werden. Zusätzlich wird untersucht, ob Zusammenhänge zu bereits bestehenden Studien erkennbar sind. Dazu werden nun die wesentlichen physikalischen Mechanismen diskutiert.

3.1 Turbulenzen

Da Erscheinung und Auftreten der Echos an die von Kelly entdeckten 'long-duration meteor trails' erinnern, wurde ein ähnlicher physikalischer Prozess dahinter vermutet. Kelly erklärte das Auftreten des 'long-duration meteor trails' mit Hilfe eines Mechanismus, der an den Entstehungsprozess der PMSE angelehnt ist [23]. Demnach ist der Streumechanismus stark abhängig von Turbulenzen in Verbindung mit einer großen Schmidtzahl in der Atmosphäre. [22] 2011 wurde von Rapp untersucht, ob die selben Prozesse, mit denen Kelly 2004 die 'long-duration meteor trails' erklärte, auch für die beobachteten VHF-Radar Echos in der E-Schicht verantwortlich sind. Dieser Zusammenhang wurde dann letztendlich ausgeschlossen, da Lidarmessungen und Kalkulationen nicht mit dieser Theorie übereinstimmten. Vertieft wird dieses Thema im Paper von Rapp [24].

3.2 Sporadische E-Schicht

Auftreten und Eigenschaften der hier untersuchten VHF-Radarechos aus der E-Schicht ähneln nicht nur den 'long-duration meteor trails', sondern erinnern auch an das Verhalten der sporadischen E-Schichten. Wie die sporadischen E-Schichten treten die VHF-Radarechos nicht kontinuierlich auf. Eine weitere Gemeinsamkeit ist die enge lokale Verteilung der Echos und der sporadischen E-Schicht. Diese Faktoren führen schließlich zu der Annahme, dass die hier beobachteten VHF-Radarechos Reflexionen an der sporadischen E-Schicht sind.

Zunächst soll genauer untersucht werden, ob das saisonale Auftreten der VHF-Radarechos, mit dem der sporadischen E-Schicht korreliert. Dazu werden nun Messungen der Grenzfrequenzen ausgewertet, die mit der Ionosonde in Juliusruh aufgenommen wurden. Die Grenzfrequenz gibt die maximale Frequenz an, die in einem bestimmten Höhenbereich reflektiert wird. Sie verhält sich proportional zur Elektronendichte. Es kann demnach anhand einer hohen Grenzfrequenz darauf geschlossen werden, dass zum Messzeitpunkt eine hohe Elektronendichte herrschte. Falls ein Zusammenhang zwischen sporadischen E-Schichten und den in dieser Arbeit beschriebenen Echos besteht, müssten die Grenzfrequenzen und die mit dem OSWIN gemessenen VHF-Radarechos in einer Art Beziehung zueinander stehen. In den Tabellen 3.1, 3.2, 3.3 und 3.4 sind die Grenzfrequenzen zu den Zeitpunkten aufgetragen, an denen mit OSWIN die VHF-Radarechos beobachtet wurden.

Es wurde registriert, dass die eindeutige Mehrzahl der Echos zu Zeiten von größeren Grenzfrequenzen (< 2 MHz) mit der hiermit verbundenen höheren Elektronendichte aufgetreten ist. Die wenigen Echos, die bei sehr geringer bzw. nicht registrierter Elektronendichte mit dem OSWIN gemessen wurden, fallen bei genauerer Betrachtung in den grenzwertigen Bereich. Da sie nur sehr kurz andauern und ein relativ schwaches SNR vorweisen, könnten es auch Meteore sein. Außerdem muss berücksichtigt werden, dass der Standort der Ionosonde in Juliusruh und somit ca. 100 km vom Standort des OSWIN-Radars entfernt ist. Sporadische E-Schichten sind sehr lokalisiert und so könnten wesentliche Unterschiede in der Elektronendichte zwischen den jeweiligen Messgebieten vorliegen.

Ein weiterer Fakt ist, dass die Echos (bis auf wenige Ausnahmen) von geringer Dauer sind. Die Mehrzahl der Echos dauert meist nicht länger als 15 Minuten an. Die Messungen der Ionosonde werden allerdings nur viertelstündlich und mit einer Zeitdauer von einer Minute durchgeführt. Letztendlich lässt sich mit diesen Daten nicht exakt aussagen, ob die VHF-Radarechos Reflexionen an sporadischen E-Schichten sind.

Es wurde aber in der Mehrheit eine erhöhte Elektronendichte während eines VHF-Radarechos registriert. Dies deutet auf einen Zusammenhang zwischen den sporadischen E-Schichten und den beobachteten VHF-Radarechos hin.

Für die Entstehung von den sporadischen E-Schichten ist der 'Windshear-Mechanism' grundlegend. [15] Um einen Zusammenhang zwischen Echos und sporadische E-Schicht bestätigen zu können, wird nun untersucht, ob die stärksten Echos mit hohen Werten der vertikalen Windscherung in einer Beziehung stehen. Dazu wurde die Abweichung vom gemittelten Wind während den Monaten Mai, Juni und Juli der Jahre 2009 bis 2011 aufgetragen. Dies wurde mit der Häufigkeitsverteilung der Echos in diesem Zeitraum verglichen und in einem gemeinsamen Plot dargestellt (siehe Abb. 3.1 und 3.2). Um zu verhindern, dass die Phasenverschiebung der halbtägigen Gezeit die Analyse verfälscht, wurde der Zeitraum bewusst auf nur drei Monate begrenzt. Die Monate Mai, Juni und Juli wurden gewählt, da in diesen Monaten am meisten Echos registriert wurden und die Phasenverschiebung gering ist. In den Abbildungen 3.1 und 3.2 ist eine Beziehung zwischen Windscherung und Echo zu erkennen. Die Scherung des Windes resultiert aus dem Einfluss der Gezeitenamplituden der Schwerewellen. Sind die Gezeitenamplituden der halbtägigen Gezeit besonders stark, so wird der Wind auch besonders stark geschert und umso mehr müssten die Elektronen zu einer engen Schicht zusammengeführt werden [16].

Abbildung 3.1 stellt die Abweichungen vom gemittelten zonalen Wind und Abbildung 3.2 die Abweichungen vom gemittelten meridionalen Wind dar. In beiden Grafiken ist eine lineare Beziehung zwischen den stärksten Abweichungen von den gemittelten Winden und Auftreten der Echos zu entnehmen. Dies wiederum unterstützt die These, dass die Echos Reflexionen an den sporadischen E-Schichten sind. Die Verschiebung zwischen den Amplituden und den Echos kann durch die Mittlung über die 3 Jahre entstanden sein, denn die Phase der halbtägigen Gezeit verschiebt sich im Laufe eines Jahres.

In dem Kapitel 2 wurden statistische Eigenschaften der VHF-Radarechos beschrieben. Unter anderem wurde dort auch die Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Höhe betrachtet. Bei der Betrachtung ist aufgefallen, dass sich das Auftreten der Echos über die Jahre verändert hat. So wurden im Jahre 2009 nahezu doppelt so viele Echos registriert wie im Jahr 2011. VHF-Radarecho Beobachtungen, die von 2004 bis

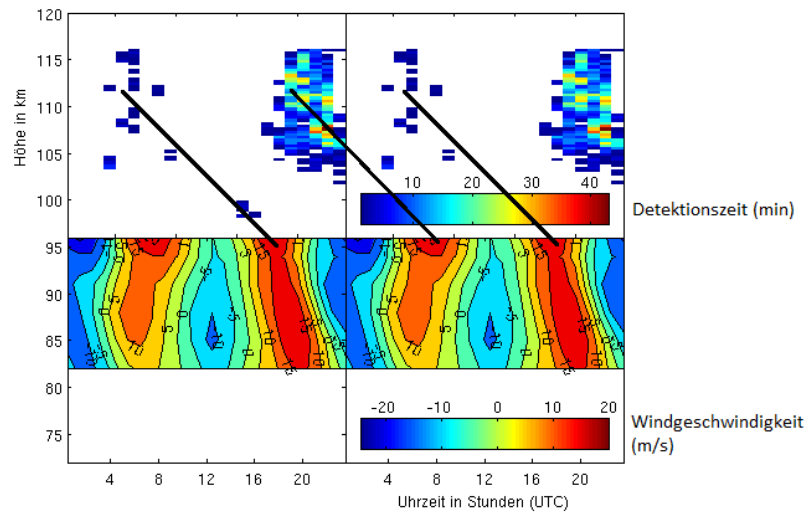


Abbildung 3.1: Abweichung vom zonalen gemittelten Wind und die tageszeitliche Verteilung der Echos

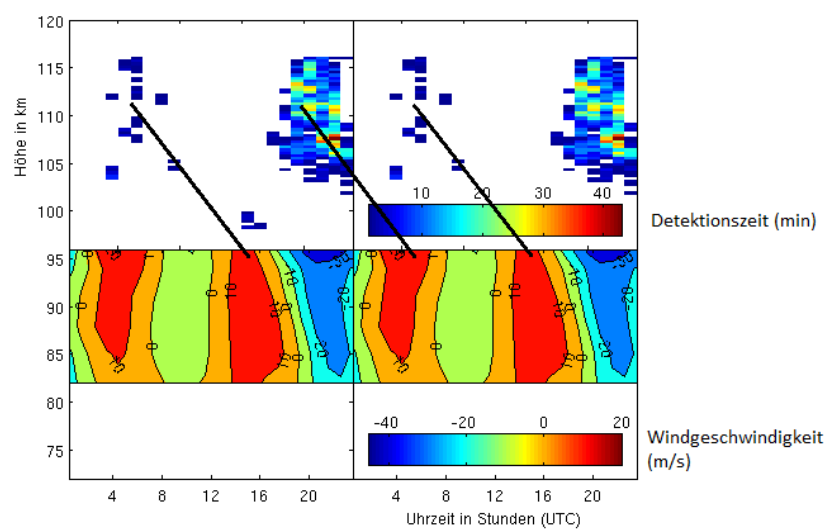


Abbildung 3.2: Abweichung vom meridionalen gemittelten Wind und die tageszeitliche Verteilung der Echos

2008 mit dem ALWIN-Radar in Andenes durchgeführt wurden, stellten einen wachsenden Trend der Häufigkeitsverteilung bis 2008 fest. Unter Vernachlässigung der unterschiedlichen geografischen Lagen der Radars werden die Beobachtungen bezüglich ihrer Häufigkeitsverteilung von 2004 bis hin zu 2011 zusammengefasst. Es wird von 2004 bis 2009 ein Anstieg und von 2009 bis 2011 ein Abfall der Häufigkeitsverteilung verzeichnet. Diese charakteristische Verteilung lässt auf einen möglichen Zusammenhang mit der Sonnenaktivität schließen. Das Jahr 2009 befindet sich im Minimum des Sonnenfleckenzykluses (siehe Abbildung 3.3). Um festzustellen, inwiefern die Elektronendichte im Bereich der E-Schicht von dem Sonnenfleckenzyklus abhängt, wurde mit Hilfe eines NASA-Modellierungsprogramms die Elektronendichte für die Jahre 2004 bis 2012 berechnet [26]. Dabei wurde für jedes Jahr die Elektronendichte am 30. Mai um 21:00 Uhr, bei einer Lage von 50° Breite und 40° Länge betrachtet. Es stellte sich heraus, dass die Elektronendichte direkt von der Sonnenfleckenanzahl bzw. von der solaren Aktivität abhängt [27]. Liegt ein Sonnenfleckenminimum vor, so ist die Elektronendichte sehr gering (siehe 3.4). Demnach sind besonders häufig Echos zu beobachten, wenn die Elektronendichte sehr gering ist. Allerdings zeigten Messwerte der Ionosonde in Juliusruh, dass zu Zeiten der Echos eine erhöhte Elektronendichte registriert wurde. Dieser Fakt kann auf veränderte Transportprozesse hinweisen, die aus der verringerten Dichte resultierten. Um genauere Aussagen diesbezüglich treffen zu können, sollten die Messungen fortgeführt werden, sodass das Messintervall einen kompletten Sonnenfleckenzyklus umfasst. Bestätigt sich die Antikorrelation zwischen den Echos und der Sonnenfleckenanzahl, müssten laut Prognose im Jahr 2019 besonders häufig Echos zu beobachten sein, da dann das nächste Sonnenfleckenminimum vorausgesagt wird.

Erneut wird der Graph der Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit der Höhe untersucht (Abb. 2.6). Es fällt auf, dass bei rund 108 km ein extremer Einbruch der Häufigkeitsverteilung vorliegt. Das gleiche gilt auch im Höhenbereich von ungefähr 116 km. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, dass die Windscherung mit der halbtägigen Gezeit variiert. Diese Beobachtung untermauert die von Arras veröffentlichten Ergebnisse. Arras schlussfolgerte, basierend auf umfangreiche Messungen, dass starke sporadische E-Schichten zu erwarten sind, wenn die Scherung des zonalen Windes negativ ist. Die Windscherung wird dabei durch die halbtägige Gezeit in den mittleren Breiten verursacht. [12] Angenommen die Echos seien Reflexionen der sporadischen E-Schicht, könnte die charakteristische Häufigkeitsverteilung bezüglich der Höhe bedeuten, dass in den Höhenbereichen 109 km und 116 km der Gradient der Windscherung positiv

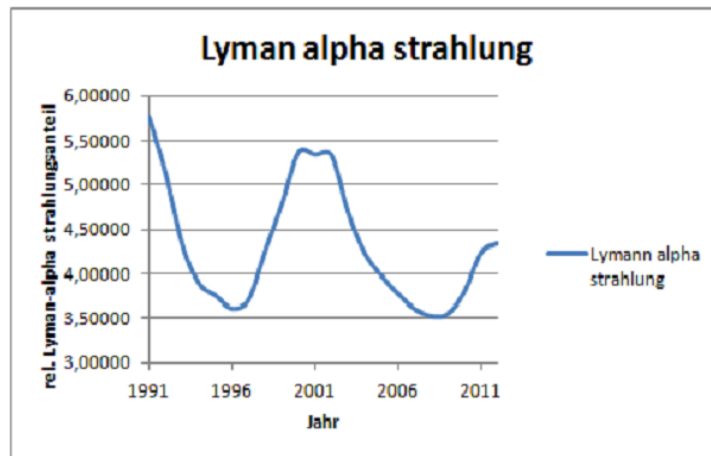


Abbildung 3.3: Variation der α -Lyman Strahlung im Zeitraum von 1991 bis 2011. nach [25]

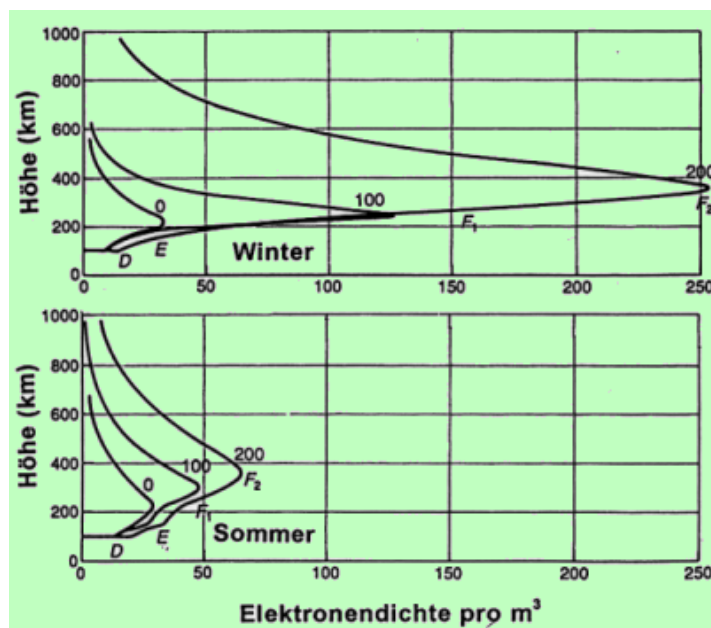


Abbildung 3.4: Elektronendichte in der Ionosphäre in Abhängigkeit von der Sonnenfleckenanzahl (0, 100, 200). nach : Aurora Beacon - DKØWCY; <http://www.dk0wcy.de/6.htm>

ist. In diesem Bereich wurde eine besonders geringe Häufigkeit verzeichnet. In den Bereichen 106 km und 111 km hingegen müsste der Gradient der Windscherung demnach negativ sein.

Verglichen mit den Werten aus Andenes, ist eine ähnliche Häufigkeitsverteilung bezüglich der Höhe zu beobachten (siehe 3.5). Allerdings wurden dort die meisten Echos schon in einer Höhe von 98 bis 100 km registriert, nach Arras These müsste der Gradient der zonalen Windscherung dort negativ sein.

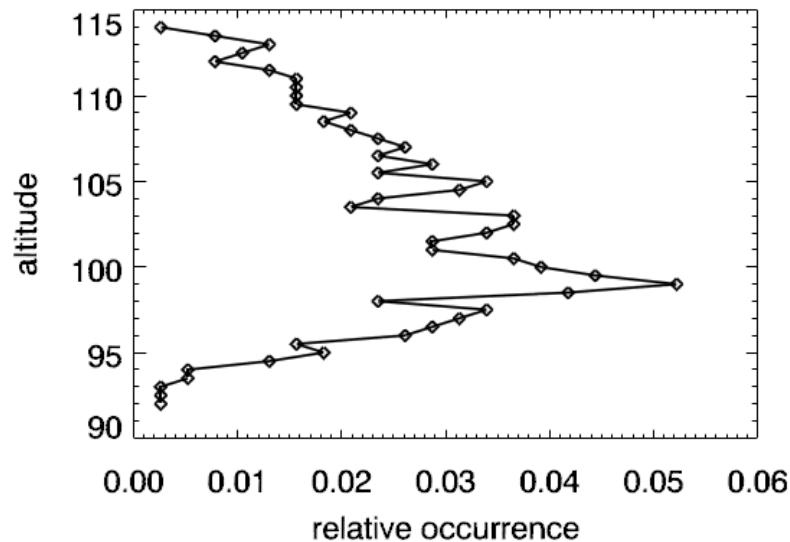


Abbildung 3.5: Häufigkeitsverteilung der Echos in Abhängigkeit von der Höhe (Andenes) nach M. Rapp, P. Hoffmann, J. Höffner, R. Latteck, L. Leitert and M. Zecha: *Localized mesosphere-stratosphere-troposphere radar echoes from the E region at 69°N: Properties and physical mechanisms*; JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH; VOL. 116;

Die Analyse der Messungen ergab, dass die VHF-Radarechos in der Mehrheit eine vertikale Ausdehnung von nur 300 m haben. Sporadische E-Schichten haben ebenfalls die Eigenschaft sehr lokalisiert zu sein. Der Fakt, dass die hier beschriebenen Echos überwiegend eine geringe Dauer von bis zu 15 min haben, lässt einen Zusammenhang zu den sporadischen E-Schichten vermuten. Mit dem OSWIN-Radar war es möglich, die Geschwindigkeit der VHF-Radarechos zu ermitteln.

3.2.1 Messwerte

YYYY	MM	DD	HH	MM	HH	MM	MHz	MHz	MHz	MHz
2009	5	8	1	5	1	10	.			
2009	5	11	16	37	16	42	3			
2009	5	12	21	32	21	42	2			
2009	5	13	18	0	19	0	4			
2009	5	23	21	0	21	2	.			
2009	6	6	17	25	17	31	4			
2009	6	6	19	0	19	25	5			
2009	6	11	20	30	20	45	3			
2009	6	11	21	0	21	15	5			
2009	6	14	17	50	18	20	4	3		
2009	6	17	18	0	18	10	5			
2009	6	21	19	33	19	42	5			
2009	6	22	18	50	19	0	5	4		
2009	6	23	18	51	19	5	3	4		
2009	6	23	19	11	19	18	4			
2009	6	30	18	20	18	28	5			
2009	7	2	19	20	19	30	2			

Tabelle 3.1: Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2009 (Julisruh)

YYYY	MM	DD	HH	MM	HH	MM	MHz	MHz	MHz	MHz
2009	7	2	19	32	19	34	2			
2009	7	4	20	15	20	21	3			
2009	7	15	20	45	21	20	3	5		
2009	7	26	19	20	19	42	4			
2009	8	5	18	0	18	27	4			
2009	8	5	19	0	19	45	5			
2009	8	5	20	33	20	58	5			
2009	8	16	18	5	18	12	4			
2009	8	30	20	15	20	58	5			
2009	9	16	7	40	7	45	3			
2009	11	20	8	15	8	30	5			
2009	12	16	3	5	3	12	.			
2009	12	20	5	25	5	40	.			
2009	12	20	0	50	6	0	.			

Tabelle 3.2: Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2009 (Juliusruh)

YYYY	MM	DD	HH	MM	HH	MM	MHz	MHz	MHz	MHz
2010	1	5	21	50	23	0	2	3		
2010	1	30	5	10	5	20	.			
2010	1	30	5	50	5	55	.			
2010	5	25	20	40	22	15	2	8		
2010	5	26	18	10	18	35	7			
2010	5	26	20	10	20	20	5			
2010	5	27	18	0	18	2	X			
2010	5	27	18	40	18	50	X			
2010	5	27	19	0	19	20	X			
2010	5	27	19	20	19	33	X			
2010	5	27	19	55	20	5	X	8		
2010	5	27	20	45	21	30	8	8		
2010	5	28	19	45	20	0	3	4		
2010	5	31	18	15	18	25	3			
2010	5	31	19	20	19	40	5			
2010	6	5	20	55	21	0	2	5		
2010	6	5	21	50	21	57	5			
2010	6	7	18	30	18	35	5			
2010	6	7	18	50	19	15	5	5		
2010	6	7	19	30	20	0	5	5		
2010	6	9	17	50	18	35	8	5		
2010	6	9	21	0	21	20	4			
2010	6	11	18	35	18	40	4			
2010	6	11	19	27	19	44	3			
2010	6	11	20	35	20	55	3			
2010	6	11	21	10	21	17	5			
2011	6	12	20	5	20	10	4			
2011	6	12	20	35	20	45	4			
2010	6	13	22	20	23	20	5	6		
2010	6	22	19	25	19	30	5			
2010	6	25	18	40	19	46	5	2		
2010	6	25	20	15	20	20	7			
2010	6	25	20	45	20	55	7			
2010	9	30	21	40	21	55	.			
2010	10	6	2	40	2	55	.			

Tabelle 3.3: Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2010 (Juliusruh)

YYYY	MM	DD	HH	MM	HH	MM	MHz	MHz	MHz	MHz
2011	5	13	19	0	19	30	4			
2011	5	20	22	25	23	45	4	4	5	8
2011	5	23	19	15	19	45	4			
2011	6	10	18	50	18	55	X			
2011	6	10	19	40	19	52	9			
2011	6	27	20	50	21	10	4	5		
2011	6	28	20	45	21	15	8	5		
2011	7	6	16	45	17	15	6	X		
2011	7	6	17	30	17	50	X			
2011	7	8	21	22	21	55	7			
2011	7	11	3	20	4	0	3	5		
2011	7	31	18	10	18	40	8			
2011	9	4	20	15	20	32	3			

Tabelle 3.4: Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2011 (Juliusruh)

H	ELECTRON DENSITY			TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%						1E16m-2	
km	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.001	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1604	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	2093	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	2176	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	2179	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1789	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	1182	0.003	351	351	351	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	767	0.002	427	427	427	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	552	0.001	491	491	491	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	465	0.001	545	545	545	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	464	0.001	590	590	590	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.5: Elektronendichte 2004 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H	ELECTRON DENSITY			TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%						1E16m-2	
km	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.002	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1518	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1907	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1972	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1975	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1621	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	1071	0.004	349	349	349	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	695	0.002	423	423	423	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	499	0.002	484	484	484	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	421	0.001	535	535	535	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	420	0.001	577	577	577	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.6: Elektronendichte 2005 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H km	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.002	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1442	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1750	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1801	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1803	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1480	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	978	0.004	347	347	347	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	634	0.002	419	419	419	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	456	0.002	477	477	477	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	384	0.001	526	526	526	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	383	0.001	566	566	566	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.7: Elektronendichte 2006 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H km	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.003	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1388	0.010	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1640	0.012	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1681	0.012	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1683	0.012	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1381	0.010	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	913	0.006	346	346	346	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	592	0.004	416	416	416	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	425	0.003	473	473	473	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	359	0.003	520	520	520	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	358	0.003	558	558	558	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.8: Elektronendichte 2007 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H km	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.002	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1357	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1580	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1615	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1616	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1327	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	877	0.004	345	345	345	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	569	0.003	414	414	414	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	409	0.002	470	470	470	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	345	0.002	516	516	516	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	344	0.002	553	553	553	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.9: Elektronendichte 2008 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H km	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.002	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1351	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1568	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1603	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1604	0.007	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1317	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	870	0.004	345	345	345	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	564	0.002	414	414	414	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	406	0.002	470	470	470	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	342	0.002	515	515	515	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	341	0.002	552	552	552	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.10: Elektronendichte 2009 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
km	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.002	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1437	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	1739	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	1789	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	1790	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1470	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	971	0.004	347	347	347	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	630	0.002	418	418	418	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	453	0.002	477	477	477	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	382	0.001	525	525	525	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	381	0.001	565	565	565	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.11: Elektronendichte 2010 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
km	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.001	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1675	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	2253	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	2353	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	2356	0.006	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	1934	0.005	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	1278	0.003	353	353	353	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	829	0.002	431	431	431	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	596	0.001	497	497	497	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	503	0.001	553	553	553	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	501	0.001	600	600	600	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.12: Elektronendichte 2011 (Nasa-Modellierungsprogramm)

H	ELECTRON DENSITY		TEMPERATURES			ION PERCENTAGES/%							1E16m-2	
km	Ne/cm-3	Ne/NmF2	Tn/K	Ti/K	Te/K	O+	N+	H+	He+	O2+	NO+	Clust	TEC	t/%
90.0	485	0.001	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	40	50	-1.0	-1
95.0	1848	0.003	-1	-1	-1	0	0	0	0	20	60	20	-1.0	-1
100.0	2655	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	5	95	0	-1.0	-1
105.0	2800	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	6	94	0	-1.0	-1
110.0	2805	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	7	93	0	-1.0	-1
115.0	2303	0.004	-1	-1	-1	0	0	0	0	10	90	0	-1.0	-1
120.0	1522	0.002	358	358	358	0	0	0	0	14	86	0	-1.0	-1
125.0	988	0.002	442	442	442	0	0	0	0	17	83	0	-1.0	-1
130.0	710	0.001	513	513	513	0	0	0	0	21	79	0	-1.0	-1
135.0	599	0.001	574	574	574	0	0	0	0	24	76	0	-1.0	-1
140.0	598	0.001	626	626	626	0	0	0	0	28	72	0	-1.0	-1

Tabelle 3.13: Elektronendichte 2012 (Nasa-Modellierungsprogramm)

Kapitel 4

Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden VHF-Radarechos in der E-Schicht untersucht. Messungen des OSWIN-Radars in Kühlungsborn dienten als Grundlage. Sie wurden in einem Zeitraum von 2009 bis 2011 aufgenommen. Mit Hilfe des Programmes MATLAB wurden die Messdaten analysiert. Es konnten wesentliche Zusammenhänge zwischen den beobachteten VHF-Radarechos und sporadischen E-Schichten erkannt werden.

Die VHF-Radarechos treten vor allem am späten Abend und frühen Morgen in den Sommermonaten auf. Hauptsächlich wurden sie im Höhenbereich von 95 km bis 116 km beobachtet. Allerdings deuten die Messwerte darauf hin, dass die Echos auch in höheren Bereichen auftreten. Der Messbereich sollte bei zukünftigen Untersuchungen entsprechend erweitert werden. Die beobachteten VHF-Radarechos dauerten überwiegend nicht länger als 15 Minuten an. Bis auf wenige Ausnahmen mit einer Dauer von etwa 100 Minuten sind die VHF-Radarechos also sehr kurz. Ihre typische vertikale Ausdehnung beträgt rund 300 m, hier muss erwähnt werden, dass die Höhenauflösung des OSWIN-Radars ebenfalls 300 m betrug und Echos auch eine deutlich geringere vertikale Ausdehnung haben können. Die SNR der Echos variierte in einem Bereich von -15 dB bis 20 dB. Die schmale spektrale Breite deutet darauf hin, dass es in dem Bereich der VHF-Radarechos keine bedeutenden Turbulenzen gab. Die typische radiale Geschwindigkeit beträgt rund $\pm 1\text{-}2$ m/s. Da die Echos eine sehr hohe Aspektempfindlichkeit vorwiesen, wurde ein Abstrahlwinkel von 0° gewählt.

Die Annahme, dass die VHF-Radarechos Streuungen von Turbulenzen mit hohen Schmidtzahlen sind, wurde basierend auf Schlussfolgerungen des Papers von Rapp, ausgeschlossen [24].

Als sehr interessant hingegen erwies sich die Vermutung, dass die beobachteten VHF-

Radarechos Reflexionen an sporadischen E-Schichten sind.

Mit Hilfe der Ionosonde in Juliusruh konnte nachgewiesen werden, dass sporadische E-Schichten und die VHF-Radarechos zum größten Teil im gleichen Zeitraum auftraten. Aussagen zu Zusammenhängen zwischen Elektronendichte der sporadischen E-Schicht und der Signalstärke des VHF-Radarechos konnten dabei allerdings nicht getroffen werden. Eine Beziehung zu den sporadischen E-Schichten würde die enge lokale Verteilung und die kurze Dauer der Echos erklären.

Es wurde gezeigt, dass das Auftreten der VHF-Radarechos linear im Zusammenhang mit starken Abweichungen vom gemittelten meridionalen und zonalen Wind steht. Dies unterstützt die These, dass die beobachteten Echos Reflexionen an der sporadischen E-Schicht sind, da die sporadischen E-Schichten auf dem 'Windshear- Mechanismus' basieren.[15], [5]

Die Peaks in der Häufigkeitsverteilung in Abhängigkeit von der Höhe weisen ebenfalls auf das charakteristische Verhalten von sporadischen E-Schichten hin. Arras stellt fest, dass starke sporadische E-Schichten zu erwarten sind, wenn die Scherung des zonalen Windes negativ ist [12]. Eventuell weisen die Peaks darauf hin, dass in den jeweiligen Höhen die Windscherung negativ ist.

Ein weiteres Ergebnis der Untersuchungen ist, dass die VHF-Radarechos als Reflexion an der sporadischen E-Schicht stark von der Sonnenaktivität beeinflusst werden. VHF-Radarecho Beobachtungen, die in einem Zeitraum von 2004 bis 2008 in Andenes und 2009 bis 2011 in Kühlungsborn durchgeführt wurden, zeigten eine Antikorrelation zum Sonnenfleckenzyklus. 2009 wurde während des Sonnenfleckenminimums eine maximale Häufigkeit der Echos verzeichnet. Mit Anstieg der Anzahl der Sonnenflecken sank die Häufigkeit der Echos. Um diesen Zusammenhang zu konkretisieren, sollten die Beobachtungen fortgeführt werden. Bei zutreffender Vermutung sind besonders viele VHF-Radarechos im Jahr 2019 zu erwarten, da dann das nächste Sonnenfleckenminimum vorausgesagt wird.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Aufbau der Atmosphäre. nach http://www.geographie.uni-muenchen.de/schneider/koeln/proseminar20klimageographie.html	3
1.2	Schichten der Ionosphäre. nach Brasseur, Guy P. and Solomon, Susan: <i>Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere</i> ; Springer e-books; 2005.	7
1.3	sporadische E-Schicht. Messungen der Ionosonde in Juliusruh vom 30.07.2012	8
1.4	windshear mechanism. nach J. D. Mathews: <i>Sporadic E: current views and recent progress</i> ; Communications and Space Sciences Laboratory 316 EE East; The Pennsylvania State University; J. Atmos;	9
1.5	technische Unterscheidungskriterien des Radars. nach http://www.radartutorial.eu/druck/Buch2.pdf	10
1.6	Maarsy-Radar in Andoya (Phased Array Antenna). nach rezn8d.com (MAARSY. Andøya, Norway 800 kW - 53.5MHz)	12
2.1	Beispiele der beobachteten VHF-Radarechos	19
2.2	Häufigkeitsverteilung von Signal to Noise Ratio	20
2.3	saisonale Verteilung	21
2.4	Häufigkeitsverteilung am Tag	21
2.5	Höhenverteilung der einzelnen 3 Jahre	22
2.6	Dauer in Minuten	23
2.7	vertikale Ausdehnung	23
2.8	spektrale Breite	24
2.9	radiale Geschwindigkeit	24
3.1	Abweichung vom zonalen gemittelten Wind und die tageszeitliche Verteilung der Echos	28

3.2	Abweichung vom meridionalen gemittelten Wind und die tageszeitliche Verteilung der Echos	28
3.3	Variation der α -Lyman Strahlung im Zeitraum von 1991 bis 2011. nach [25]	30
3.4	Elektronendichte in der Ionosphäre in Abhängigkeit von der Sonnenfleckenanzahl (0, 100, 200). nach : Aurora Beacon - DKØWCY; http://www.dkØwcy.de/6.htm	30
3.5	Häufigkeitsverteilung der Echos in Abhängigkeit von der Höhe (Andenes) nach M. Rapp, P. Hoffmann, J. Höffner, R. Latteck, L. Leitert and M. Zecha: <i>Localized mesosphere-stratosphere-troposphere radar echoes from the E region at 69°N: Properties and physical mechanisms</i> ; JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH; VOL. 116;	31

Tabellenverzeichnis

1.1	Bandbreiten der verschiedenen Radararten. nach Vorlesungsskript Atmosphärenphysik; 10. Semester; Uni Rostock; 2012.	15
3.1	Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2009 (Juliusruh)	32
3.2	Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2009 (Juliusruh)	33
3.3	Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2010 (Juliusruh)	34
3.4	Grenzfrequenzen zu Zeiten der Echos im Jahr 2011 (Juliusruh)	35
3.5	Elektronendichte 2004 (Nasa-Modellierungsprogramm)	35
3.6	Elektronendichte 2005 (Nasa-Modellierungsprogramm)	35
3.7	Elektronendichte 2006 (Nasa-Modellierungsprogramm)	36
3.8	Elektronendichte 2007 (Nasa-Modellierungsprogramm)	36
3.9	Elektronendichte 2008 (Nasa-Modellierungsprogramm)	36
3.10	Elektronendichte 2009 (Nasa-Modellierungsprogramm)	36
3.11	Elektronendichte 2010 (Nasa-Modellierungsprogramm)	37
3.12	Elektronendichte 2011 (Nasa-Modellierungsprogramm)	37
3.13	Elektronendichte 2012 (Nasa-Modellierungsprogramm)	37

Literaturverzeichnis

- [1] M. Forkel: *Das Klima der Erde | Die Atmosphäre der Erde*; <http://www.m-forkel.de/klima/atmosphaere.html>; 05.07.2012; 15:00.
- [2] F. Olschewski: *BERGISCHE UNIVERSITÄT WUPPERTAL :: FB C :: PHYSIK :: Atmosphärenphysik :: Thermosphäre*; <http://www.atmos.physik.uni-wuppertal.de/atmosphaere/thermosphaere.html>; 13.08.2012; 16:30.
- [3] :Physik der Atmosphäre II; <http://www.iup.uni-heidelberg.de/institut/studium/en/lehre/Atmosphaerenphysik/script2/intro.pdf>
- [4] G. Klawitter: *Ionosphäre und Wellenausbreitung: Zusammenhänge zwischen Sonne, Ionosphäre und weltweitem Funkempfang - Vorhersage von Ausbreitungsbedingungen - Funkprognosen*; Siebel; Meckenheim; 3. Aufl; 2000.
- [5] J. D. Whitehead: *Formation of the sporadic E layer in the temperate zones*; Nature; 188, 567.; 1960.
- [6] M. Jeschke: *Die Atmosphäre*; http://private.freepage.de/cgi-bin/feets/freepage_ext/41030x030A/rewrite/marjano/Atmos.htm; 05.07.2012; 14:00.
- [7] M. Wößner: *Die Erdatmosphäre*; <http://www.kowoma.de/gps/zusatzerklaerungen/atmosphaere.htm>; 15.08.2012; 16:00.
- [8] M. Forkel: *Ernst Klett Verlag - Schulbücher, Lehrmaterialien und Lernmaterialien*; Ernst Klett Verlag GmbH; http://www2.klett.de/sixcms/list.php?page=geo_infothek&node=Grundlagen+der+Klimatologie&article=Infoblatt+Atmosphäre; 15.08.2012; 16:15.
- [9] K. Schlegel: *Ionosphärenforschung*; http://www.mps.mpg.de/dokumente/publikationen/pa/pa_9808_ionosphaere.pdf; Max-Planck-Institut für Aeronomie; Lindau; 07. 07.2012; 13:00.
- [10] A. von Keudell: *Einführung in die Plasmaphysik*; <http://reaktiveplasmen.rub.de/files/skripten/skriptPP.pdf>; Ruhr-Universität Bochum; 07. 07. 2012.; 14:00.
- [11] Brasseur, Guy P. and Solomon, Susan: *Aeronomy of the Middle Atmosphere: Chemistry and Physics of the Stratosphere and Mesosphere*; Springer e-books; 2005.
- [12] C. Arras, J. Wickert and C. Jacobi: *Semidiurnal tidal signature in sporadic E occurrence rates derived from GPS radio occultation measurements at higher midlatitu-*

- des; Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for Geosciences (GFZ), Department 1: Geodesy and Remote Sensing, Germany University of Leipzig, Institute for Meteorology, Germany; 2009.
- [13] T. Hagfors and K. Schlegel: *Earth's ionosphere*; Springer; Max-Planck-Institut für Aeronomie; Katlenburg-Lindau; Germany; 2001.
- [14] P. A. Bernhardt; J. Werne; M. F. Larsen: : Modeling of Sporadic-E Structures from Wind-Driven Kelvin-Helmholtz Turbulence In Characterising the Ionosphere (pp. 34-1 – 34-14); Meeting Proceedings RTO-MP-IST-056; Paper 34.; Neuilly-sur-Seine; France; <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>; 10. 07. 2012; 14:30.
- [15] J. D. Mathews: *Sporadic E: current views and recent progress*; Communications and Space Sciences Laboratory 316 EE East; The Pennsylvania State University; J. Atmos; Sol. Terr. Phys.; 60, 413–435; 1998.
- [16] C. Haldoupis: *A Tutorial Review on Sporadic E Layers*; Aeronomy of the Earth's Atmosphere and Ionosphere; 29; 381-393; Springer; 2011.
- [17] C. Wolff: *Das Radartutorial* <http://www.radartutorial.eu/druck/Buch2.pdf>; 15. 07. 2012; 17:00.
- [18] C. Wolff: *Minimale und Maximale Messentfernung*; <http://www.radartutorial.eu/01.basics/rb09.de.html>; 15. 07. 2012; 17:30.
- [19] Vorlesungsskript Atmosphärenphysik; 10. Semester; Uni Rostock; 2012.
- [20] Rubach: *Optimierung der Phased-Array Antenne des ST-Radars in Kühlungsborn für senkrechte und schräge Abstrahlung*; Diplomarbeit; Institut für Atmosphärenphysik an der Universität Rostock; 1998.
- [21] F. J. Lübken, M. Rapp, T. Blix, and E. Thrane: *Microphysical and turbulent measurements of the Schmidt number in the vicinity of polar mesosphere summer echoes*; Geophys. Res. Lett.; 25; 893–896.; 1998.
- [22] F. J. Lübken, B. Strelnikov, M. Rapp, W. Singer, R. Latteck, A. Brattli, U. P. Hoppe, and M. Friedrich: *The thermal and dynamical state of the atmosphere during polar mesosphere winter echoes* Atmos. Chem. Phys., 5, 13–24.; Institut für Atmosphärenphysik; 2006.
- [23] M. C. Kelley: *A new explanation for longduration meteor radar echoes: Persistent charged dust trains*; Radio Sci.; 39; RS2015; doi:10.1029/2003RS002988; 2004.
- [24] M. Rapp, P. Hoffmann, J. Höffner, R. Latteck, L. Leitert and M. Zecha: *Localized mesosphere-stratosphere-troposphere radar echoes from the E region at 69°N: Properties and physical mechanisms*; JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH; VOL. 116; A02320; doi:10.1029/2010JA016167; 2011.
- [25] T. Woods;2008;Composite Lyman Alpha; <http://laspl.colorado.edu/>; 16.07.2012; 13:30.

-
- [26] <http://modelweb.gsfc.nasa.gov/models/iri.html>; 01. 08.2012; 10:30.
- [27] : Aurora Beacon - DKØWCY; <http://www.dk0wcy.de/6.htm>; 01.08.2012; 14:00.
- [28] : Das Ostsee-Wind-Radar; <http://www.iap-kborn.de/OSWIN-VHF-Radar.176.0.html>; 16.07.2012; 16:30.

Danksagung

Mit dieser Arbeit schlieÙe ich mein Bachelor-Studium ab. Die Arbeit am IAP war eine sehr schöne Erfahrung und hat ein großes Interesse bezüglich der Atmosphärenphysik geweckt.

Zuerst möchte ich Herrn Prof. Dr. Lübken danken. Er ermöglichte mir erst die Arbeit am Institut.

Ich möchte mich bei meinen Betreuern Prof. Dr. Markus Rapp und Dr. Marius Zecha für ihre Hilfe, Geduld und stets konstruktive Kritik danken.

Ein großer Dank geht auch an meine Zimmergenossen Dr. Gunter Stober und Heiner Asmus sowie meinem Kommilitonen Sergej Ryl, die mir bei physikalischen und auch technischen Fragen immer sehr geholfen haben.

Für die Bereitstellung der Daten von der Ionosonde in Juliusruh, möchte ich mich bei Dpl. Jens Mielich bedanken. Ebenfalls eine große Hilfe war mit tatkräftiger Unterstützung Dr. Peter Hoffmann.

Zum Schluss möchte ich mich bei meinen Eltern, meinem Freund Martin und meinen Freunden bedanken. Ohne ihre Unterstützung während des Studiums hätte ich wahrscheinlich schon nach dem zweiten Semester abgebrochen.

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und ohne fremde Hilfe verfasst habe, keine außer den von mir angegebenen Hilfsmitteln und Quellen dazu verwendet habe und die den benutzten Werken inhaltlich und wörtlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Rostock, (Datum)