

Untersuchung kleinskaliger Schichten in der Atmosphäre mittels Interferometrie

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

von Svenja Lara Sommer, geb. am 10. Februar 1988 in Hamburg

Betreuer und 1. Prüfer : Prof. Dr. M. Rapp, Universität Rostock2. Prüfer:Dr. M. Zecha, Institut für Atmosphärenphysik

Rostock, den 17. August 2010

ii

Abstract

This bachelor-thesis examines small-scale alterations in the atmosphere. In the first instance conventional radar data are compared to range-imaging data. To this end layers in the lower atmosphere are detected with both methods. Subsequently occurrences of layers will be analysed statistically. For the purpose of comparison radiosonde data is used to calculate the Brunt-Väisälä-frequency and related to the occurrence of atmospheric layers.

iv

Zusammenfassung

Diese Bachelorarbeit untersucht kleinskalige Änderungen in der Atmosphäre. Zunächst werden dazu klassische Radardaten mit Range-Imaging-Daten verglichen. Dazu werden mit beiden Verfahren in der unteren Atmosphäre Schichten detektiert. Anschließend soll das Vorkommen statistisch ausgewertet werden. Als Vergleich soll noch aus Radiosondendaten die Brunt-Väisälä-Frequenz errechnet und in einen Zusammenhang mit dem Auftreten von Schichten gestellt werden.

vi

Inhaltsverzeichnis

1.	Vorb	petrachtung	1
	1.1.	Einleitung	1
	1.2.	Die Atmosphäre	2
		1.2.1. Aufbau der Atmosphäre	2
		1.2.2. Schichten in der Atmosphäre	2
	1.3.	Methoden zur Atmosphärenbeobachtung	3
		1.3.1. Radarverfahren	3
		1.3.2. Radiosonden	6
2.	Mes	sung	9
	2.1.	Daten des Radars	9
	2.2.	Analyse der Daten	10
		2.2.1. Vorbereitung der Daten	10
		2.2.2. Identifizierung der Schichten	11
		2.2.3. Bestimmung der oberen und unteren Grenzen einer Schicht	12
	2.3.	Wahl der Parameter	12
		2.3.1. Klassische Daten	13
		2.3.2. RIM-Daten	13
	2.4.	Analyse des zeitlichen Verlaufs	14
	2.5.	Radiosonden-Daten	14
3.	Räu	mliche und zeitliche Untersuchung	17
	3.1.	Klassische Radardaten	17
	3.2.	RIM-Daten	19
	3.3.	Zeitlicher Verlauf	21
	3.4.	Radiosonde	23
4.	Disk	sussion	25
	4.1.	Auftreten von Schichten	25

	4.2. Vergleich mit Radiosonde	27			
	4.3. Zusammenfassung	28			
A.	Abbildungen	31			
	A.1. Vergleich Entstörung	31			
B.	Algorithmus	33			
	B.1. Räumliche Analyse	33			
	B.2. Zeitliche Analyse	45			
Lit	Literaturverzeichnis				

Kapitel 1.

Vorbetrachtung

1.1. Einleitung

Die Atmosphäre umgibt unseren Planeten, schützt die Erdoberfläche vor kosmischer Strahlung und ist verantwortlich für Wetter und Klima. Schon länger gibt es die Möglichkeit, großskalige Phänomene in der Atmosphäre mit Hilfe von Radar (**ra**dio **d**etection **a**nd **r**anging) zu beobachten. Dünne Schichten konnten bisher mit diesem Verfahren nicht detektiert werden. Um diese kleinskaligen Untersuchungen durchführen zu können, müssen Verfahren entwickelt werden, die diese Änderungen auflösen können. Hierzu kann die Radar-Interferometrie genutzt werden. Mit ihrer Hilfe kann eine Höhenauflösung weit unter der verwendeten Pulslänge erreicht werden, indem mit dicht beieinanderliegenden Frequenzen gemessen wird. Die Auflösung verbessert sich mit Hilfe dieses Verfahrens von 300 m auf 2 m.

Diese Bachelorarbeit soll Aufschluss über kleinskalige Schichten bringen. Dazu werden zuerst die Schichten mit einem klassischen Radarverfahren und anschließend mit einem hochauflösendem Verfahren untersucht. Des Weiteren soll noch ein Vergleich mit einer in-situ-Messung durch eine Radiosonde vorgenommen werden. Dabei soll untersucht werden, ob diese kleinskaligen Schichten bei nicht-turbulenten Prozessen entstehen.

In der Vorbetrachtung soll zu Beginn ein kurzer Überblick über die beiden Radarverfahren gegeben und die Radiosonde beschrieben werden. Anschließend werden die analytischen Methoden dargestellt und eine Auswertung der Ergebnisse vorgenommen. Zum Schluss werden die Ergebnisse verglichen und eine Zusammenfassung gegeben.

1.2. Die Atmosphäre

1.2.1. Aufbau der Atmosphäre

Die Atmosphäre kann durch physikalische Eigenschaften, maßgeblich die Temperatur, charakterisiert werden, wobei diese Eigenschaften hauptsächlich von der Höhe



Abb. 1.1.: Verlauf der Temperatur in Abhängigkeit von der Höhe über der Erdoberfläche, Quelle: www.iup.uni-heidelberg.de

über der Erdoberfläche abhängen. Weiteren Einfluss haben auch die geographischen Lage und die Jahreszeit; die verschiedenen Höhenprofile können stark voneinander abweichen. Höhen annähernd gleicher physikalischer Eigenschaften werden zusammengefasst, wobei sie von unten angefangen Troposphäre, Stratosphäre, Mesosphäre und Thermosphäre genannt werden (s. Abbildung 1.1). Die Übergänge dazwischen werden Tropospause, Stratospause und Mesopause genannt. Diese Schichtungen der Temperatur liegen in einem großskaligen Bereich. Es kommt noch zu weiteren, kleineren Schichtungen, die hier untersucht werden.

1.2.2. Schichten in der Atmosphäre

Neben den oben erwähnten Schichten kommt es durch verschiedene Prozesse zur Ausbildung kleinskaliger Schichten. Diese kleinskaligen Schichtungen können z.B. Ozonschichten in der Stratosphäre, Cirruswolken oder ionosphärische Schichten sein. Schichtungen sind mit dem Radar messbar; hierbei wird die Schichtung anhand der unterschiedlichen Reflektivität verschiedener Höhen ermittelt. Diese durch ein Radar detektierbaren Reflektionen können verschiedene Ursachen haben. Zum einen kann Rückstreuung durch horizontale Schichtungen mit unterschiedlichen Brechungsindizes hervorgerufen werden. Der weitaus dominantere Teil der Rückstreuung wird jedoch durch Turbulenzen in der Atmosphäre hervorgerufen. Diese Turbulenzen verusachen chaotische Änderungen in der Dichte und Temperatur und führen ebenfalls zu einer Änderung im Brechungsindex, die detektiert werden kann. [Hocking, 2002a] Durch diese Beobachtung der Schichten können in der Atmosphärenphysik Rückschlüsse auf Turbulenzen oder Schwerewellen gezogen werden.

1.3. Methoden zur Atmosphärenbeobachtung

Im Folgenden werden die im Rahmen dieser Arbeit verwandten Verfahren erläutert.

1.3.1. Radarverfahren

Funktionsprizip



Abb. 1.2.: Range-Zeit-Plot nach Röttger [1984]

Zunächst soll allgemein das herkömmliche gepulste Radarverfahren beschrieben werden.

Wird ein Radioimpuls mit der Dauer Δt zum Zeitpunkt t_0 nach oben in die Atmosphäre abgestrahlt, bewegt sich dieser Impuls mit der Lichtgeschwindigkeit c vorwärts und divergiert mit zunehmender Höhe. Nun kann es wie schon in 1.2.2 beschrieben zu einer Rückstreuung des Radioimpulses kommen, der zum Zeitpunkt t_1 wieder empfangen wird. Bei der Rückstreuung wird ein kleiner Teil des Signal zurückreflektiert, der Hauptteil des Signals propagiert weiter. Die Höhe R der Rückstreuung kann nun über das Verhältnis von Laufzeit zu Strecke bestimmt werden, da die Geschwindigkeit bekannt ist.

$$2R = c(t_1 - t_0)$$

Da der gesendete Impuls eine nicht infinite kleine Breite Δt besitzt, kann auch die Höhe der Rückstreuung nur in einem bestimmten Bereich festgelegt werden, wobei dieser als ΔR gegeben ist.

$$\Delta R = c \frac{\Delta t}{2}$$

Damit hängt die bestmögliche Auflösung des Radars direkt von der Pulsbreite ab. Zudem divergiert der Radarstrahl mit zunehmender Höhe und es kommt zu einer horizontalen Ausdehnung. Durch die Divergenz und die Pulslänge wird ein räumliches Gebiet untersucht, dies wird das Radarvolumen genannt. In einer Höhe von 10 km wird horizontal eine Fläche mit dem Radius $r \approx 1$ km ausgeleuchtet, die Höhe des Radarvolumens beträgt $h \approx 300$ m. Da nicht nur ein einzelner Radioimpuls ausgesendet wird, sondern die Aussendung periodisch ist, kann es zu Fehlern kommen, indem der Impuls von t_{n-1} an einer hohen Schicht reflektiert wird und erst nach dem Aussenden des Impulses t_n empfangen wird. Dieses Signal wird fälschlicherweise nun dem Impuls t_n zugeordnet und als Reflektion registriert. Also hängt die Qualität das Radars auch von der Zeit zwischen zwei Impulsen - die sogenannte inter-pulse periode - T_{ipp} ab. Die maximale Höhe, die von diesem Effekt nicht betroffen ist, wird durch $R_{max} = \frac{T_{ipp}c}{2}$ gegeben.

Um die Höhenauflösung des Radars zu verbessern, kann die Pulsbreite verringert werden. Die Küpfmüllersche Unschärferelation der Nachrichtentechnik sagt aber aus, dass die Zeitdauer und die Bandbreite nicht gleichzeitig beliebig klein sein können. Für einen gaußförmigen Impuls gilt:

$$\Delta t \cdot \Delta f = \frac{1}{4\pi}$$

Weitere Frequenzen werden aber durch die Bandbreite des Radars begrenzt, weshalb mit dem klassischen Radarverfahren eine beliebig hohe Auflösung nicht möglich ist.

Frequency Domain Interferometry und Range Imaging

Wie eben beschrieben, hängt die Höhenauflösung eines klassisch gepulsten Radars direkt von der Pulsbreite Δt und der Bandbreite ab. Hiermit ist also die Auflösung nicht beliebig verbesserbar, da die Bandbreite durch die eingesetzen Antennen nicht beliebig vergrößerbar ist. Deshalb wurde, um die Auflösung zu verbessern, das Frequency Domain Interferometry (FDI)-Verfahren entwickelt [Palmer et al., 1993]. Eine schematische Darstellung des FDI-Verfahrens ist in Abbildung 1.3 gegeben. Hierbei werden



Abb. 1.3.: Schematische Darstellung des FDI-Verfahrens

zwei, im Frequenzbereich nahe beieinanderliegende Gauß-Impulse emittiert. Die Differenz der beiden Frequenzen Δf sollte zu $\Delta f = \frac{1}{\Delta t}$ gewählt werden, denn so variiert die Phasenlage von 0 bis 2π zwischen den unteren und oberen Grenzen des Radarvolumens. Die relative Phasenlage kann gemessen und somit dazu benutzt werden, Schichten innerhalb des Radarvolumens zu detektieren. Hiermit ist es möglich, eine schmale Schichtung innerhalb des Radarvolumens durch Interferometrie zu ermitteln. Eine Weiterentwicklung des FDI-Verfahrens ist das sogenannte Range Imaging Verfahren (RIM), bei dem nicht zwei, sondern m verschiedene Frequenzen verwendet werden [Palmer et al., 1999]. Diese können in kurzer Zeitfolge nacheinander oder, wenn eine kohärente Aussendung gegeben ist, gleichzeit gesendet werden. Beim Empfangen werden die Signale kohärent integriert, man erhält $s(t) = (s_1(t), \ldots, s_m(t))$ Signale. Diese Signale werden anschließend mit einem Gewichtungsvektor w gewichtet und die Autokorrelationsfunktion angewendet. Daraus kann die "range brightness"

B gewonnen werden, die die Signalstärke in einem kleinen Volumen abschätzt. Die Auflösung des RIM-Verfahrens ist durch die Messung der Phasenlage begrenzt.

1.3.2. Radiosonden

Bei Radarmessungen handelt es sich um Messungen, die nicht direkt vor Ort, sondern aus der Entfernung vorgenommen werden. Um nun Messwerte zu erhalten, die direkt vor Ort - und so mit wesentlich höherer räumlicher Auflösung - gemessen werden können, werden Radiosonden eingesetzt.

Eine Sonde ist unter einem mit Helium gefüllten Ballon befestigt und kann bis zu 40 km hoch in die Atmosphäre aufsteigen. Auf Grund des geringen Drucks in dieser Höhe platzt der Ballon und die Sonde fällt an einem Fallschirm zurück auf die Erde. Diese Messsonden erfassen verschiedene Parameter wie Temperatur, Druck, Feuchte und Winde und senden sie mittels Radiowellen an die Bodenstation.

Die Temperatur wird mit Hilfe eines Drahtes gemessen, wobei die Kapazität des Drahtes von seiner Länge abhängt. Die Länge hängt wiederum von der Temperatur des Drahtes ab. Ähnlich funktioniert der Luftfeuchtigkeitssensor. Bei ihm handelt es sich um einen Dünnfilm-Kondensator, wobei sich anlagernde Wassermoleküle die Kapazität ändern. Der Druck wird durch ein Silizium-Drucksensor gemessen. Hierbei biegt sich eine Membran auf Grund des Druckunterschieds, wodurch sich die Länge von den aufgebrachten Dehnungsmessstreifen ändert. Dies wiederum führt zu einer Änderung ihres Widerstands, der über den Spannungsabfall gemessen werden kann. Die Winde werden nicht direkt gemessen, sondern aus der Flugbahn des Ballons errechnet. Dazu hat die Sonde einen GPS (global positioning system)-Empfänger, wodurch die Position und die Geschwindigkeit der Sonde bekannt ist. Daraus lassen sich die Windvektoren errechnen [Vaisala group].

Brunt-Väisälä-Frequenz

Um Aussagen über die vertikale Stabilität in der Atmosphäre machen zu können, wurde die Brunt-Väisälä-Frequenz N eingeführt. Hierbei wird eine Vertikalbewegung durch eine gedämpfte Schwingung beschrieben. Diese Schwingung beschreibt die Auf-

triebsschwingung um das hydrodynamische Gleichgewicht. Es gilt:

$$N = \sqrt{\frac{g}{T}} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

wobei *g* die Erdbeschleunigung, T die Temperatur und θ die potentielle Temperatur ist, die angibt, welche Temperatur ein Luftpaket annehmen würde, wenn es adiabatisch (d. h. ohne Austausch thermischer Energie mit der Umgebung) auf Normaldruck $p_0 = 1000hPa$ gebracht wird.

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{R_L}{c_p}} \tag{1.1}$$

Diese Brunt-Väisälä-Frequenz kann aus den von der Radiosonde gelieferten Daten gewonnen werden.

Es können für die Brunt-Väisälä-Frequenz drei Lösungen auftreten: $N^2 > 0$, dann liegt eine stabile Schichtung vor und die Luftpakte oszillieren um ihre Ausgangslage. Sie steigen nicht weiter auf.

Wenn $N^2 = 0$, dann liegt eine indifferente Schichtung vor, die Schwingungsdauer ist unendlich. Ist $N^2 < 0$, so steigt das Luftpaket weiter in der Atmosphäre auf. Es liegt eine instabile Schichtung vor.

Je größer ein positives N ist, desto stabiler ist die Schichtung.

Kapitel 2.

Messung

Die Messungen wurden alle am 25.03.2010 vorgenommen, wobei die Radarmessung von 9:07 Uhr bis 13:12 Uhr lief. Sie wurde sowohl mit dem klassischen als auch mit dem RIM-Verfahren durchgeführt. Die Radiosonde wurde um 9:53 Uhr gestartet und erreichte eine Höhe von 20 km um 10:56 Uhr.

2.1. Daten des Radars

Das benutze OSWIN-Radar wurde 1999 in Betrieb genommen und steht in Kühlungsborn, Mecklenburg-Vorpommern, Deutschland (54,1°N, 11,8 °E) am Institut für Atmosphärenphysik.

Es liegt an der Ostsee, daher auch der Name OSWIN (Ostsee-Wind-Radar). Es besteht aus 144 Vier-Element-Yagi-Antennen, wobei vier Antennen jeweils eine Einheit bilden. Das Antennenfeld kann somit als eine 6x6-Matrix beschrieben werden, wobei der Abstand der Antennen zueinander $\lambda/2$ beträgt. Die Frequenz des Radars beträgt f = 53, 5 MHz und liegt folglich im VHF (very high frequency)-Bereich. Die Höhe für Messungen beträgt h = 1-18km und ist damit im Bereich der Troposphäre und Stratosphäre einzuordnen. Weitere Messungen sind mit diesem Radar möglich, werden aber im Rahmen dieser Bachelorarbeit nicht diskutiert.

Die Höhenauflösung beträgt im klassischen Radarverfahren $\Delta h_{min} = 300 \text{ m}$. Im RIM-Verfahren mit fünf verschiedenen Frequenzen von $f = 53,25 \dots 53,75 \text{ MHz}$ verbessert sich die Höhenauflösung auf $\Delta h_{min} = 2 \text{ m}$.

Brightness [dB



Abb. 2.1.: Klassisches Verfahren. Das SNR wird farbcodiert in Abhängigkeit von der Höhe und Zeit dargestellt. Die Farbcodierung findet sich am rechten Rand und hat die Einheit Dezibel.



hat die Einheit Dezibel.

RIM, 25.03.10

14

12

10

Höhe [km]

2.2. Analyse der Daten

2.2.1. Vorbereitung der Daten

Die reflektierten Radarpulse werden detektiert und mit Hilfe eines Computers ausgewertet. Zunächst wird direkt nach dem Empfang die zurückgestrahlte Intensität einem Höhenkanal zugeordnet (siehe dazu auch 1.3.1). Dies geschieht mit Hilfe der Laufzeit. Anschließend werden die Daten über einen Zeitraum von zwei Minuten gesampelt. Für die klassischen Radardaten wird für die Analyse das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise-Ratio, SNR) verwendet.

Zunächst müssen die Daten auf Fehler untersucht werden. Diese können u. a. durch den Strahl hindurchfliegende Flugzeuge, Störungen der Anlage oder Meteore, die in der Mesosphäre auftreten können, hervorgerufen werden. Die Meteore werden dann, wie in 1.3.1 beschrieben, fälschlicherweise niedrigeren Höhenkanälen zugeordnet. Deshalb werden die Daten durch einen Algorithmus geschickt, der den Wert eines bestimmten Zeitpunkts t_n mit den Werten der Zeitpunkte t_{n-1} und t_{n+1} vergleicht. Hier soll nur der Algorithmus dargelegt werden, die Wahl der Parameter wird in 2.3 erläutert. Der Wert von t_n wird akzeptiert, wenn

$$\left|\frac{I(t_{n-1}) + I(t_{n+1})}{2} - I(t_n)\right| < x_{\text{Störung}}$$

erfüllt ist. Ist dies nicht der Fall, wird $I(t_n) = \frac{I(t_{n-1}) + I(t_{n+1})}{2}$ gesetzt.

Außerdem kommt es zu einem Offset, der berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund wird ein Schwellwert eingeführt, so dass für alle weiteren verwendeten Datensätzen gelten soll

$$I = \begin{cases} I(t) & I(t) \ge x_{\text{Schwelle}} \\ 0 & I(t) < x_{\text{Schwelle}} \end{cases}$$

Ein Vergleich der beiden Datensätze befindet sich im Anhang A.1.

2.2.2. Identifizierung der Schichten

Wie schon in 1.2.2 beschrieben, können durch die Stärke des reflektierten Signals Schichtungen detektiert werden. Die einzelnen Schichten werden anhand der Maxima gefunden, wobei zunächst für alle Maxima gelten soll:

$$I(z_{n-1}) < I_{\max}(z) > I(z_{n+1})$$

Dabei soll zunächst einer Schicht ein Maximum zugeordnet werden. Da eine Schicht mehrere Peaks besitzen kann, wird dieses Problem als nächstes untersucht. Dazu werden zwei weitere Parameter eingeführt, die bestimmen, wie weit zwei Peaks i_1 , i_2 in der Höhe und der Intensität auseinanderliegen können, damit sie eigenständigen Schichten zugeordnet werden können.

$$x_{\Delta h} < h_{i_2} - h_{i_1}$$
$$x_{\Delta I} < I_{i_2} - I_{i_1}$$

Es werden nun für jeden Zeitpunkt die einzelnen Höhenprofile untersucht und die Maxima einer Schicht betrachtet, wobei das Maximum mit der größten Intensität das Hauptmaximum wird. Um Messanomalien zu vermeiden, bei denen Maxima an den Flanken der Schichten liegen, müssen die Schichten auch noch einen Abstand x_{Grenze} zur unteren und oberen Grenze haben. Dieser kann erst bestimmt werden, nachdem die obere und untere Grenze festgelegt wurde. Der Abstand zwischen $I_{max}(z)$ und beiden Grenzen $I(z_{uG})$ soll für eine eigenständige Schicht eine bestimmte Differenz x_{Grenze} betragen:

$$I_{max}(z) - I(z_{uG}) > x_{Min} \land I_{max}(z) - I(z_{oG}) > x_{Min}$$

2.2.3. Bestimmung der oberen und unteren Grenzen einer Schicht

Als Hauptkriterium soll gelten, dass eine untere bzw. obere Grenze vorliegt, wenn

$$I(z_{uG}) < I_{max}(z) - y \land I(z_{uG+1}) \ge I_{max}(z) - y$$
$$I(z_{oG}) < I_{max}(z) - y \land I(z_{uG-1}) \ge I_{max}(z) - y$$

Es gibt aber Fälle, bei denen $I_{max}(z) \ge I_{max}(z) - y < 0$, in diesem Fall ist $I(z_{uG}) = 0 \land I(z_{uG+1}) > 0$, analog für die obere Grenze. Auch wenn zwei Schichten überlappen, kann das Hauptkriterium nicht erfüllt werden. In diesem Fall ist die untere Grenzschicht der oberen Schicht die obere Grenze der unteren Schicht. Dabei gilt $I(z_{n-1}) > I(z_G) < I(z_{n+1})$.

Als Beispiel sind die Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 gegeben. Hier kann man sehen, dass sowohl im klassischen als auch im RIM-Verfahren bis zu einer Höhe von $h \approx 5 \text{ km}$ ein starkes Signal auftritt, welches dann mit zunehmender Höhe schwächer wird. Im Bereich von h = 13 km kommt es zu leicht erhöhten Signal.

2.3. Wahl der Parameter

Wie eben beschrieben, hängt die Analyse von einer Reihe Parameter ab. Die Wahl dieser Parameter hat einen starken Einfluss auf das Ergebnis. Zudem muss unterschieden werden, ob klassische Radardaten oder RIM-Daten vorliegen, da sich die Rohdaten unterscheiden.



Abb. 2.3.: Höhenprofil, klassisch. Das SNR ist Abb. 2.4.: Höhenprofil, RIM. Die Helligkeit ist
in Abhängigkeit von der Höhe dar-
gestellt.Höhenprofil, RIM. Die Helligkeit ist
in Abhängigkeit von der Höhe dar-
gestellt.

2.3.1. Klassische Daten

Die klassischen Daten haben eine Signalstärke von $I = 0 \dots 47 \text{ dB}$; als Wert für die Entstörung wird $x_{\text{Störung}} = 10 \text{ dB}$ gewählt, denn dadurch wird gewährleistet, dass anormale Abweichungen von normalen unterschieden werden können. Als Schwelle für das Rauschen wird $x_{\text{Schwelle}} = 0 \text{ dB}$ gewählt, da es sich um ein SNR handelt und somit Signalstärken kleiner als das Hintergrundrauschen nicht beachtet werden.

Damit Peaks zu derselben Schicht gehören, muss $x_{\Delta I} < 2 \,\mathrm{dB}$ und $x_{\Delta h} < 600 \,\mathrm{m}$ (zwei Höhenkanäle) sein. Die minimalen Abstände der Maxima zu den Grenzen - um als Schicht erkannt zu werden - wird hier mit $x_{Grenze} = 1 \,\mathrm{dB}$ gewählt. Für den Parameter der Grenzen wird $y = 7 \,\mathrm{dB}$ gewählt.

2.3.2. RIM-Daten

Wie oben für die klassischen Daten beschrieben, werden analog die Parameter für die RIM-Daten gewählt. Hierbei wird die Schwelle $x_{Schwelle} = 55 \text{ dB}$ so gewählt, dass die Signale von klassisch und RIM im selben Bereich liegen, von 0 bis 47 dB. Die einzige Anpassung, die vorgenommen werden muss, ist die des Höhenunterschieds $x_{\Delta h}$ für zwei Schichten. Hier sollen Schichten, die einen Höhenunterschied von $\Delta h < 100 \text{ m}$ (50 Höhenkanäle) und einen Signalunterschied von B < 2 dB aufweisen, zusammengefasst werden. Die unterschiedliche Wahl von Δh für das klassische und das RIM-Verfahren beruht darauf, dass beim RIM-Verfahren die Auflösung sehr viel höher ist als bei der klassischen Methode. Bei einer Wahl von kleineren Δh für das RIM-Verfahren würden Schichten nicht zusammengefasst werden. Würde Δh zu groß gewählt, ginge der Vorteil des RIM-Verfahrens mit der besseren Höhenauflösung verloren.

Parameter	klassisch	FDI
$x_{St\"orung}$	10 dB	10 dB
$x_{Schwelle}$	0 dB	55 dB
$x_{\Delta I}$	2 dB	2 dB
$x_{\Delta h}$	600 m	100 m
x_{Grenze}	1 dB	1 dB
y	7 dB	7 dB

Tab. 2.1.: Übersicht über die verwendeten Parameter

2.4. Analyse des zeitlichen Verlaufs

Die Untersuchung des zeitlichen Verlaufs der Schichten wird anhand der Maxima vorgenommen. Dazu wird aus den oben gewonnen Daten die Lage der Maxima herausgesucht. Anschließend werden die Anfänge der Schichten gesucht, das heißt Maxima herausgefiltert an Stellen, bei denen zum Zeitpunkt zuvor in einem gewissen Höhenbereich $h_{Bereich} = \pm h$ keine Maxima detektierbar waren. Anhand dieser Anfänge wird dann der weitere Verlauf untersucht, wobei für ein Fortbestehen einer Schicht zum nächsten Zeitpunkt innerhalb des Höhenbereichs ein weiteres Maximum auftreten muss. Ist dies nicht der Fall, ist das Ende einer Schicht erreicht. Die minimale Fortdauer einer Schicht muss zwei Zeitintervalle betragen, dies entspricht vier Minuten.

2.5. Radiosonden-Daten

Für die in-situ-Messung wurden Daten der Radiosonde RS92-SGP der Vaisala group alle 2s gemittelt. Dies ergibt bei einer Steigrate von $v_h \approx 5.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ eine mittlere Höhenauflösung von $\Delta h_{min} = 10.6 \text{ m}$.

Die Temperatur- und Druckdaten werden als Höhenprofil in Abbildung 2.5 und Abbildung 2.6 dargestellt.



Die Temperatur fällt in der Stratosphäre ab und erreicht in einer Höhe von $h=12\,{\rm km}$

Abb. 2.5.: Temperatur in Abhängigkeit der Abb. 2.6.: Druck in Abhängigkeit der Höhe, Höhe, gemessen mit der Radiosonde

ein lokales Minimum. Oberhalb fluktuiert die Temperatur leicht. Der Druck nimmt mit zunehmender Höhe exponentiell ab.

Weitere Daten (Luftfeuchte, Windvektoren) wurden erfasst, werden aber nicht weiter ausgewertet.

Kapitel 3.

Räumliche und zeitliche Untersuchung

Die Auswertung der Verteilung der Schichten erfolgt anhand ihrer räumlichen Verteilung, ihrer Dicke und ihres zeitlichen Auftretens. Dafür werden die klassischen und RIM-Daten zunächst gesondert ausgewertet und anschließend miteinander verglichen. Danach wird das Auftreten von Schichten im Kontext der atmosphärischen Stabilität (Brunt-Väisälä-Frequenz) diskutiert. Dazu wurden am 25.03.2010 parallel Messungen mit dem klassischen und dem RIM-Verfahren vorgenommen, zudem wurde eine Radiosonde gestartet.

3.1. Klassische Radardaten

Die Dicken und die Abstände werden in Klassen eingeteilt, wobei die Klassenbreite 300 m beträgt. Die Dicke einer Schicht *i* ergibt sich aus der Differenz zwischen oberer und unterer Grenze:

$$d(i) = SNR_{oG}(i) - SNR_{uG}(i)$$

Die Untersuchung der Dicke der Schichten (s. Abbildung 3.1) ergibt mit dem klassischen Radar-Verfahren eine Verteilung, die ihr Maximum bei einer Dicke von $d_{n_{max}} =$ 1350 m hat. Die Werte erstrecken sich von $d_{min} = 300$ m bis $d_{max} = 3600$ m, die Halbwertsbreite (Breite der Verteilung auf halber Höhe des Maximums, FWHM) dieser Verteilung beträgt $d_{FWHM} = 1900$ m.

Der Abstand einer Schicht i zur nächsten Schicht (i + 1) soll durch den Abstand der



Abb. 3.1.: Dicke, klassisch



Abb. 3.2.: Abstand, klassisch

Maxima gegeben sein:

$$a(i) = SNR_{max}(i+1) - SNR_{max}(i)$$

Der Peak der Verteilung der Abstände (Abbildung 3.2) liegt bei $a_{n_{max}} = 1350 \text{ m}$, die Abstände verteilen sich von $a_{min} = 300 \text{ m}$ bis $a_{max} = 6000 \text{ m}$. Die Halbwertsbreite ist $a_{\text{FWHM}} = 2400 \text{ m}$.



Abb. 3.3.: Höhenverteilung, klassisch

Die Verteilung der Schichten in der Höhe zeigt bei der klassischen Messung zwei Maxima auf, deren Peaks bei $h_1 = 2,8 \text{ km}$ und $h_2 = 11 \text{ km}$ liegen. Der erste Peak hat eine Halbwertsbreite von $h_{1,\text{FWHM}} = 2,0 \text{ km}$ und der zweite von $h_{2,\text{FWHM}} = 2,8 \text{ km}$. Bei h = 6 km liegt ein Minimum an Schichten vor.

Bei 140 Messungen konnten insgesamt über die gesamte Höhe n = 717 Schichten nachgewiesen werden, wobei nicht das Fortbestehen einer Schicht, sondern ausschließlich das Auftreten während eines Messintervalls gezählt wird.

3.2. RIM-Daten

Für eine bessere Auswertbarkeit wurden die Dicken und die Abstände der Schichten jeweils gebündelt, wobei immer 20 m, also zehn mögliche Dicken, zusammengefasst wurden. Die Analyse der Dicke (s. Abbildung 3.4) der Schichten ergibt mit dem Range Imaging-Verfahren eine Verteilung, die ihr Maximum bei einer Dicke von $d_{n_{max}} = 210 \text{ m}$ hat. Die Werte erstrecken sich von $d_{min} = 60 \text{ m}$ bis $d_{max} = 660 \text{ m}$, die Halbwertsbreite dieser Verteilung beträgt $d_{\text{FWHM}} = 180 \text{ m}$.

Der Peak der Verteilung der Abstände (Abbildung 3.5) liegt bei $a_{n_{max}} = 300 \text{ m}$, die Abstände verteilen sich von $a_{min} = 20 \text{ m}$ bis $a_{max} = 4800 \text{ m}$. In Abbildung 3.6 ist ein Ausschnitt der Abstandsverteilung dargestellt. Der Peak der Abstandsverteilung liegt bei $a_{n_{max}} = 300 \text{ m}$. Die Halbwertsbreite des Peaks beträgt $a_{\text{FWHM}} = 100 \text{ m}$. Die Vertei-



Abb. 3.5.: Abstand, RIM

lung der Schichten in der Höhe (Abbildung 3.7) zeigt bei der RIM-Messung mehrere Maxima auf, der größte Peak liegt bei h = 12.9 km, im Bereich von h = 1.3...6, 1 km liegen sechs Peaks. Bei h = 6.7 km liegt ein Minimum vor, genau wie bei h = 9.5 km und h = 10.7 km. Bei 140 Messungen konnten insgesamt über die gesamte Höhe n = 2142 Schichten gemessen werden.



Abb. 3.6.: Abstand, RIM, Ausschnitt



Abb. 3.7.: Höhenverteilung, RIM

3.3. Zeitlicher Verlauf

Die Dauer der Schichten wurde anhand der Maxima bestimmt. Für die klassischen Daten wurde der Höhenbereich $h = \pm 600 \text{ m}$ gewählt, also fünf Höhenkanäle. Für die RIM-Daten wurde $h = \pm 40 \text{ m}$, dies entspricht 41 Höhenkanälen. Beim klassischen Verfahren liegt die Dauer der Schichten in einem Zeitraum von $t = 4 \dots 208 \text{ min}$, beim RIM-Verfahren im Zeitraum von $t = 4 \dots 40 \text{ min}$.

Beim klassischen Verfahren konnten 80 zusammenhängende Schichten erkannt wer-



Abb. 3.8.: Dauer der Schichten im klassischen Verfahren



Abb. 3.9.: Dauer der Schichten im RIM-Verfahren

den, also Schichten, die über mindestens zwei Zeitintervalle fortbestehen. Beim RIM-Verfahren konnten insgesamt 435 Schichten detektiert werden.

3.4. Radiosonde

Wie oben erwähnt, liefert die Radiosonde Temperatur- und Druckdaten in Abhängigkeit von der Höhe. Daraus lässt sich nach 1.3.2 das Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz berechnen:

$$N(i)^{2} = \frac{g}{T(i)} \frac{\theta(i+1) - \theta(i)}{h(i+1) - h(i)}$$



Abb. 3.10.: Brunt-Väisälä-Frequenz in Abhängigkeit von der Höhe

Das Quadrat Brunt-Väisälä-Frequenz nimmt im Bereich von $h = 0 \dots 10$ km sowohl negative als auch positive Werte an. Dies bedeutet, dass hier sowohl stabile Schichtungen als auch instabile Schichtungen dicht beieinanderliegen. Die Anzahl der stabilen Schichtungen überwiegt.

Im Höhenbereich von $h = 10 \dots 13$ km liegt bei h = 10,91 km eine instabile Schichtung vor, ebenso bei h = 12,73 km. Stabile Schichtungen liegen in diesem Höhenbereich bei h = 10,8 km sowie h = 12,35 km, h = 12,86 km und h = 13,24 km.

Eine graphische Darstellung des Fluges der Radiosonde befindet sich in Abbildung 3.11. Die Sonde erreichte eine Höhe von 20 km um 10:56 Uhr, zu diesem Zeitpunkt befand sie sich 32 km nördlich und 10 km östlich des Startpunktes. Die Höhen 10 km und 20 km sind in der Graphik markiert, um zu verdeutlichen, dass die Radiosonde den Messbereich des Radars in diesen Höhen verlassen hat. Das Radar (markiert mit



Abb. 3.11.: Übersicht über den zurückgelegten Weg der Radiosonde

IAP) deckt in 10 km Höhe eine kreisförmige Fläche mit dem Durchmesser $d = 2 \,\mathrm{km}$ ab.

Kapitel 4.

Diskussion

4.1. Auftreten von Schichten

Nachdem die Messergebnisse für beide Radar-Verfahren vorliegen, können diese miteinander verglichen werden.

Übereinstimmungen in der Höhenverteilung gibt es im Bereich 1.5 km < h < 5.5 km, in dem bei beiden Messungen vermehrt Schichten auftreten. Des Weiteren liegt im Bereich h = 6 km jeweils ein Minimum vor, ab h = 11 km sind vermehrt Schichtungen nachweisbar, ab h = 14 km treten keine Schichtungen mehr auf.





Abb. 4.1.: Verteilung der Schichten in der Höhe, gemessen mit dem klassichen Verfahren

Abb. 4.2.: Verteilung der Schichten in der Höhe, gemessen mit dem RIM-Verfahren



Abb. 4.3.: Anzahl Schichten pro Zeitraum von zwei Minuten

Die beiden Messungen liefern in der Höhenverteilung insofern unterschiedliche Ergebnisse, als dass im unteren Bereich (h < 6 km) bei der klassischen Messung ein deutlicher Peak zu erkennen ist, beim RIM-Verfahren liegen mehrere gleichhohe Peaks vor. Dies könnte an der besseren Höhenauflösung des RIM-Verfahrens liegen, denn hier können mehrere Schichten erfasst werden, die beim klassischen Verfahren zu einer Schichtung zusammengefasst werden.

Ähnliches gilt auch in der Dickemessung. Der Peak der Dickenverteilung des RIM-Verfahrens liegt bei d = 210 m. Er liegt damit in einem deutlich kleineren Höhenbereich als der Peak der Schichtenverteilung des klassischen Verfahrens, der bei d = 1350 m liegt. Die Dickenverteilungen der Schichten weichen voneinander ab, denn das RIM-Verfahren liefert eine deutlich bessere Auflösung. Das ist auch an der Anzahl der Schichten in einen bestimmtem Zeitraum erkennbar, so treten bei den klassischen Daten 717 Schichten auf, bei den RIM-Daten 2142 Schichten. Beim Abstand der Schichten zueinander erstrecken sich die Abstände im klassischen Verfahren von $a_{min} = 300 \text{ m}$ bis $a_{max} = 6000 \text{ m}$. Das RIM-Verfahren liefert Abstände von $a_{min} = 20 \text{ m}$ bis $a_{max} = 4800 \text{ m}$. Der Peak liegt hier wieder in einem deutlich niedrigeren Bereich als beim klassischen Verfahren, genauer bei $a_{nmax} = 300 \text{ m}$ statt $a_{nmax} = 1350 \text{ m}$. Im zeitlichen Verlauf lassen sich mit dem klassischen Verfahren 80 Schichten detektieren, beim RIM-Verfahren sind es 435. Die Beständigkeit von Schichten ist im klassischen Verfahren höher, hier können Zeiten von $t = 4 \dots 208 \text{ min}$ gefunden werden. Beim RIM-Verfahren ist die Dauer der Schichten im Mittel kürzer, hier liegen die Zeiten bei $t = 4 \dots 40$ min. Dies lässt sich zum einen damit erklären, dass für die Berechnung der Dauer zwei verschiedene Höhenbereiche gewählt worden sind. Zum anderen kann es auch wieder daran liegen, dass mehrere Schichten im RIM-Verfahren im klassischen Verfahren zu einer zusammengefasst werden und daher eine scheinbar längere Schicht detektiert wird. Beim RIM-Verfahren können wir also dünnere, dichter zusammenliegende Schichten detektieren als beim klassischen Verfahren.

4.2. Vergleich mit Radiosonde

Die Brunt-Väisälä-Frequenz soll nun mit der Maximaverteilung in der Höhe des RIM-Verfahrens verglichen werden.

Auffallend an der Höhenverteilung der Schichten ist, dass bei h = 6.7 km, h = 9.5 km sowie h = 10.7 km Minima vorliegen. Bei der Brunt-Väisälä-Frequenz finden sich bei h = 6.4 km, h = 9.11 km, h = 10.91 km sowie h = 12.73 km stark negative Werte für N^2 , die auf eine instabile Schichtung hinweisen. Damit liegt für die drei Bereiche mit wenig Schichten eine instabile Schichtung vor.

Eine große Anzahl Schichten findet sich im Bereich h = 12,3km, hier ist N^2 im positiven Bereich, damit ist hier die Schichtung stabil. So liegt auch bei h = 12,9 km eine stabile Schichtung vor, die Schichtenanzahl hat hier ihren stärksten Peak. Damit deutet



Höhe, gemessen mit dem klassischen Verfahren der Klasder Höhe

sich an, dass wenig Schichten mit dem Radar-Verfahren zu erkennen sind, wenn eine instabile Schichtung vorliegt. Es scheinen mehr Schichten aufzutreten, wenn N^2 posi-

tiv ist und damit eine stabile Schichtung vorliegt. Damit könnte es sein, dass Schichten durch nicht-turbulente Prozesse wie Windscherungen entstehen und durch Turbulenzen zerstört werden.

Allerdings liegt bei h = 12,7 km kein Minimum der Schichtenanzahl vor, obwohl eine stark instabile Schichtung durch ein negatives N^2 gegeben ist. Somit ist kann die Schlussfolgerung, dass durch eine instabile Schichtung vermehrt Schichten im Radarbild auftreten, nicht nicht in allgemeingültiger Form gezogen werden. Dies liegt zum einen an den verschiedenen Möglichkeiten der Reflektion des Radarstrahls, von denen einige bis heute nicht bekannt sind [Hocking, 2002a].

Zudem ist auch zu bedenken, dass die Radarmessung stationär vorgenommen wurde. Die Radiosonde hingegen steigt nicht gerade nach oben, sondern wird vom Wind weggetragen. Damit kann nicht gewährleistet werden, dass die Messung der Radiosonde in größerer Höhe mit dem Radar übereinstimmt. Trotzdem gibt sie einen Hinweis darauf, dass die Brunt-Väisälä-Frequenz erhöht zu sein scheint, wenn eine Schicht mit dem Radar detektiert wird. Dies bedarf aber einer weiteren Untersuchung, wobei nicht nur ein Zeitpunkt, sondern mehrere verschiedene Zeiten oder ein längerer Zeitraum mit mehreren Radiosondenstarts untersucht werden sollte. Eine weitere Möglichkeit besteht noch darin, die Messzeit des Radars auf die Aufstiegszeit der Radiosonde zu begrenzen; hier wurde mit dem Radar über einen Zeitraum von vier Stunden gemessen, die Radiosonde verließ den Höhenbereich des Radars nach unter einer Stunde. Dies sind Möglichkeiten, den Zusammenhang zwischen turbulenten Prozessen und Schichtenbildung weiter zu untersuchen.

4.3. Zusammenfassung

Mit dem RIM-Verfahren konnten mit 140 Einzelmessungen 2142 Schichten detektiert wurden. Beim klassischen Verfahren waren es 717 Schichten. Damit konnten 2,98 mal mehr Schichten beim RIM- als beim klassischen Verfahren erkannt werden. Die erkannte Dicke im RIM-Verfahren war im Mittel sechs mal kleiner als bei der klassischen Methode. Das RIM-Verfahren eignet sich also besser als das klassische Verfahren, kleinskalige Phänomene in der Atmosphäre zu detektieren.

Der Vergleich der Brunt-Väisälä-Frequenz mit der Höhenverteilung der Maxima der Schichten könnte darauf hindeuten, dass die Schichtung stabil ist, wenn eine Schicht mit dem RIM-Verfahren detektiert wird. Es scheinen weniger Schichten vorhanden zu sein, wenn wenn die Schichtung instabil ist. Damit scheinen kleinskalige Schichten durch nicht-turbulente Prozesse zu entstehen und durch Turbulenzen zerstört werden.

Anhang A.

Abbildungen

A.1. Vergleich Entstörung



Hier soll der Algorithmus der Entstörung graphisch an den Daten dargestellt werden.

Abb. A.1.: Radardaten vor dem Entnadeln

Abb. A.2.: Radardaten nach dem Entnadeln



Abb. A.3.: Radardaten vor dem Entnadeln

Abb. A.4.: Radardaten nach dem Entnadeln

Anhang B.

Algorithmus

B.1. Räumliche Analyse

Matlab-Code für die Analyse der RIM-Daten, die klassischen Daten werden analog durchgerechnet, die Parameter ändern sich, siehe dazu 2.2.1

```
1 clear all;
  close all;
  load('FDIwerte.mat');
  hmax=6301; %1 höhe entspricht 2m
6 Power=FDIvisible (:,:);
  tmax=size(FDIvisible,2) ; %anzahl spalten in matrix
  pmaxzaehler{3}=zeros(hmax,tmax);
11 untere \{3\} = NaN(hmax, tmax);
  obere{3}=NaN(hmax,tmax);
  ug=zeros(1,tmax);
  og=zeros(1,tmax);
16 pmax{3}=NaN(hmax,tmax);
  obere1{3}=NaN(hmax,tmax);
   untere1{3}=NaN(hmax,tmax);
21 sw=55; %Schwellwert für rauschen, in dB, was darunter liegt wird gleich 0
      gesetzt
  y=7; %schwelle für schicht bei maxima
  nadl=10; %ab nadl wird der mittelwert eingesetzt zum entnadeln
```

```
x=2;%differenz für maxima in db
   deltah = 50;
  mw=0;
26
   p=1; %Abstand zwischen grenze und schicht, damit Anomalien an der flanke
      einer schicht erkannt werden
                  % entstören
   for h=1:hmax
       for t=1:tmax;
           Power(h, t)=Power(h, t)-sw;
31
           if Power(h,t)<0;</pre>
               Power(h, t) = 0;
           end
       end
       for t = 2:tmax - 1;
           mw=(Power(h, t-1)+Power(h, t+1))/2;
           if mw+nadl < abs(Power(h,t)) % mittelwert liegt außerhalb des
41
               bereichs, mittelwert einsetzen
               Power(h, t)=mw;
           end
       end
   end
46
   for t=1:tmax; % maxima herraussuchen
       s = 0;
       for h=2:hmax-1;
           Power1=Power(h-1,t);
           Power2=Power(h,t);
           Power3=Power(h+1,t);
56
           if (Power2>=0) && (Power1<Power2) && (Power2>=Power3) %sucht die
               maxima raus
               s=s+1;
                                              %power der maxima hintereinander
               pmaxzaehler{1}(s,t)=Power2;
                    in der tabelle zum besseren vergleich pmaxzähler{1} sind
                   die snr werte {2} sind die höhen
               pmaxzaehler{2}(s,t)=h;
61
```

```
end
       end
  end
  for t=1:tmax % größeres maximum bestimmen
66
       q=size(nonzeros(pmaxzaehler{1}(:,t)),1);
       for i=1:q-1
           if abs(pmaxzaehler{1}(i,t)-pmaxzaehler{1}(i+1,t))<x && pmaxzaehler
               \{1\}(i,t)>pmaxzaehler\{1\}(i+1,t) \& pmaxzaehler\{2\}(i+1,t)-
               pmaxzaehler{2}(i,t)<deltah
               pmaxzaehler{1}(i+1,t)=pmaxzaehler{1}(i,t);
71
               pmaxzaehler \{2\}(i+1,t)=pmaxzaehler \{2\}(i,t);
                                                               % bedinungen
                   damit das erste maximum das hauptmaximum wird
           end
           if abs(pmaxzaehler{1}(i,t)-pmaxzaehler{1}(i+1,t))<x && pmaxzaehler
               \{1\}(i,t) < pmaxzaehler\{1\}(i+1,t) \& pmaxzaehler\{2\}(i+1,t)-
               pmaxzaehler{2}(i,t)<deltah</pre>
               pmaxzaehler \{1\}(i, t) = pmaxzaehler \{1\}(i+1, t);
               pmaxzaehler{2}(i,t)=pmaxzaehler{2}(i+1,t);
                                                               %bediungungen
                   damit das zweite maximum das hauptmaximum wird
           end
81
       end
  end
   for t=1:tmax
       q=size(nonzeros(pmaxzaehler{1}(:,t)),1);
86
       for i=1:q-1;
           for n=1:10;
                if pmaxzaehler{1}(i,t)==pmaxzaehler{1}(i+1,t)
                                                                  % wenn zwei
                   maxima zu einem werden, werden zunächst der neue wert in
                   beide plätze geschrieben, deshalb muss einer der werte
                   gelöscht werden und die nächsten werte müssen nachrutschen
                    for j=1:q-i;
91
                        pmaxzaehler{1}(i+j-1,t)=pmaxzaehler{1}(i+j,t);
                        pmaxzaehler{2}(i+j-1,t)=pmaxzaehler{2}(i+j,t);
                        if i+j==q
                            pmaxzaehler \{1\}(i+j,t)=0;
```

```
pmaxzaehler{2}(i+j,t)=0;
96
                        end
                   end
               end
           end
       end
101
   end
   for t=1:tmax %maxima in pmaxzaehler schreiben
       q=size(nonzeros(pmaxzaehler{1}(:,t)),1);
       for i=1:q
           for h=1:hmax
               if h==pmaxzaehler{2}(i,t);
                   pmaxzaehler{3}(h, t)=pmaxzaehler{1}(i, t);
               end
           end
       end
   end
   su=zeros(size(pmaxzaehler{1},1),tmax); % zähler für grenzschicht, wird
      auf 1 gesetzt wenn grenze gefunden ist, um zu verhindern das mehrere
      grenzen existieren
   so=zeros(size(pmaxzaehler{1},1),tmax);
   for t=1:tmax
                   %grenzschichten oben und unten raussuchen für jeweils eine
       zeit
       q=size(nonzeros(pmaxzaehler{1}(:,t)),1); % nur so viele durchgänge
121
           pro zeit wie auch grenzen vorhanden sind
       for i = 1:q;
                     %pro maximum jeweils eine obere und untere schicht
           raussuchen
           for h=2:hmax-1; %zählweise für obere grenzen, bestimmung der
               oberen grenzen
               if pmaxzaehler \{1\}(i, t)-y>0
                    if i==1 % fallunterscheidung, wenn pmaxzaehler-y negativ
                       wird. dann ist zwar grenze erreicht, aber bedingung
                       nicht erfüllt für untere und obere grenzen, da
                       powerwerte immer größer gleich sind
                       % fall abdecken, das nächste schicht schon anfängt
                           bevor grenzwert erreicht wird
```

131	<pre>if Power(h,t)<=pmaxzaehler{1}(i,t)-y && Power(h-1,t)> pmaxzaehler{1}(i,t)-y && h>pmaxzaehler{2}(i,t) && h <pmaxzaehler{2}(i+1,t) &&="" obere{1}(i,t)="Power(h,t);" obere{2}(i,t)="h;" obere{3}(h,t)="Power(h,t);" so(i,t)="1;</pre"></pmaxzaehler{2}(i+1,t)></pre>
	elseif Power(h,t)>pmaxzaehler{1}(i,t)-v && Power(h-1,t)
	\rightarrow
	$pmaxzaehler{2}(i t) &\& so(i t) ==0$
136	obere{1}(i,t)=Power(h,t); %stärke der oberen
	grenze
	(2)(h,t)-Dowor(h,t), $(matrix mit at a rho dor)$
	grenze an der stelle (h, t)
	og(t) = og(t) + 1;
	so(i,t)=1;
141	end
	end
	if ia
	if Dower(h t) $< -nmay 22ehler [1](i t) - v & Bower(h - 1 t) > 0$
	$pmaxzaehler \{1\}(i,t)-y & & h>pmaxzaehler \{2\}(i,t) & & a (i,t)=0$
	SO(1, 1) == 0
146	$ODere\{1\}(1, t) = Power(11, t);$
	$ODEre\{2\}(1, t) = Ii;$
	ODEre(3)(II, I) = POWEr(II, I);
	SO(1, t) = 1;
	elself Power(n,t)>pmaxzaenier{1}(1,t)-y & Power(n-1,t) > Power(h,t) $\frac{9}{2}$ Power(h+1,t)> Power(h,t) $\frac{9}{2}$ h>
	p prover (II, t) \propto prover (II+1, t) > prover (II, t) \propto II>
	$p = \frac{1}{(i + i)} = P = 0$
151	$ODETE \{1\}(1, t) = POWEI(11, t);$
	$ODEre\{2\}(1, t) = Ii;$
	$ODEre \{3\} (\Pi, L) = POWEr (\Pi, L);$
	0g(t)=0g(t)+1;
1=4	so(1, 1) = 1;
156	enu
	CIIC
	if i~=1 && i~=q

```
if Power(h, t) <= pmaxzaehler\{1\}(i, t)-y \& Power(h-1, t)>(
                             pmaxzaehler{1}(i,t)-y) & h>pmaxzaehler{2}(i,t) &
                             h \leq pmaxzaehler \{2\}(i+1,t) \& so(i,t) == 0
                              obere \{1\}(i,t)=Power(h,t);
161
                              obere\{2\}(i,t)=h;
                              obere \{3\}(h,t) = Power(h,t);
                              so(i, t) = 1;
                          elseif Power(h, t)>pmaxzaehler{1}(i, t)-y & Power(h-1,
                              t)>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h,t) && h>
                              pmaxzaehler{2}(i,t) && so(i,t)==0 && h<pmaxzaehler</pre>
                              \{2\}(i+1,t)
                              obere \{1\}(i,t)=Power(h,t);
166
                              obere\{2\}(i,t)=h;
                              obere \{3\}(h,t) = Power(h,t);
                              og(t)=og(t)+1;
                              so(i, t) = 1;
                          end
171
                     end
                 else
                        % fall das y negativ wird und geänderte if bediungung
                     benötigt werden
                     if i==1
                          if h>pmaxzaehler{2}(i,t) \& h<pmaxzaehler{2}(i+1,t)
176
                             && so(i,t)==0 && Power(h,t)==0 && Power(h-1,t)>0 &&
                               h>pmaxzaehler{2}(i,t)
                              obere \{1\}(i,t)=Power(h,t)+1;
                              obere\{2\}(i,t)=h;
                              obere \{3\}(h, t) = Power(h, t) + 1;
                              so(i, t) = 1;
                          elseif Power(h-1,t)>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h
181
                              ,t) && h>pmaxzaehler{2}(i,t) && so(i,t)==0
                              obere {1}(i,t)=Power(h,t);
                              obere{2}(i,t)=h;
                              obere \{3\}(h,t) = Power(h,t);
                              og(t)=og(t)+1;
                              so(i, t) = 1;
186
                          end
                     end
                     if i == q
                          if Power(h-1,t)>0 & h>pmaxzaehler\{2\}(i,t) & so(i,t)
                              ) = = 0 \&\& Power(h, t) = = 0
```



```
if pmaxzaehler{1}(i,t)-y>0
    if i==1
         if Power(h, t)<=pmaxzaehler{1}(i, t)-y && Power(h+1,t)>
            pmaxzaehler{1}(i,t)-y && h<pmaxzaehler{2}(i,t) &&</pre>
            su(i,t)==0 %unterer grenzwert fürs erste maximum
             untere \{1\}(i,t)=Power(h,t);
             untere \{2\}(i, t)=h;
             untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
             ug(t)=ug(t)+1;
             su(i, t) = 1;
         elseif Power(h,t)>pmaxzaehler{1}(i,t)-y && Power(h-1,t)
            )>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h,t) && h<
            pmaxzaehler{2}(i,t) \& su(i,t) == 0
             untere \{1\}(i, t) = Power(h, t);
             untere \{2\}(i, t)=h;
             untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
             ug(t) = ug(t) + 1;
             su(i, t) = 1;
         elseif Power(h-1,t)<=pmaxzaehler{1}(i,t)-y && Power(h,
            t)>pmaxzaehler{1}(i,t)-y && su(i,t)==0 && h<
            pmaxzaehler{2}(i,t)
             untere \{1\}(i, t)=Power(h-1, t);
             untere \{2\}(i, t)=h-1;
             untere \{3\}(h,t)=Power(h-1,t);
             ug(t)=ug(t)+1;
             su(i, t) = 1;
         elseif h==2 & Power(h,t)==pmaxzaehler{1}(i,t) & su(i
            , t) = = 0
             untere \{1\}(i,t)=Power(h-1,t);
             untere \{2\}(i, t)=h-1;
             untere \{3\}(h,t)=Power(h-1,t);
             ug(t)=ug(t)+1;
             su(i, t) = 1;
         elseif h==2 && Power(h-1,t)==pmaxzaehler\{1\}(i,t) && su
            (i, t) = = 0
             untere \{1\}(i, t)=Power(h-1, t);
             untere \{2\}(i, t)=h-1;
             untere \{3\}(h,t)=Power(h-1,t);
             ug(t)=ug(t)+1;
             su(i, t) = 1;
```

241

246

251

256

281

286

```
elseif pmaxzaehler\{1\}(i,t)-y<Power(2,t) & h==2 & su(
        i, t) = = 0
         untere \{1\}(i, t)=Power(h-1, t);
         untere \{2\}(i, t)=h-1;
         untere \{3\}(h,t)=Power(h-1,t);
         ug(t)=ug(t)+1;
         su(i, t) = 1;
    end
end
if i==q
    if Power(h, t)<=pmaxzaehler{1}(i, t)-y && h<pmaxzaehler
        {2}(i,t) && Power(h+1,t)>(pmaxzaehler{1}(i,t)-y) &&
         su(i, t) == 0 \& h > pmaxzaehler \{2\}(i-1, t)
         untere \{1\}(i, t) = Power (h, t);
         untere \{2\}(i, t)=h;
         untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
         ug(t)=ug(t)+1;
         su(i, t) = 1;
    elseif Power(h, t)>pmaxzaehler{1}(i, t)-y && Power(h-1, t
        )>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h,t) && h<
        pmaxzaehler{2}(i,t) \& su(i,t) == 0 \& h > pmaxzaehler
        \{2\}(i-1,t)
         untere \{1\}(i, t)=Power(h, t);
         untere \{2\}(i, t)=h;
         untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
         ug(t)=ug(t)+1;
         su(i, t) = 1;
    end
end
if i~=1 && i~=q
    if Power(h, t) <= pmaxzaehler\{1\}(i, t)-y \& Power(h+1, t) >
        pmaxzaehler{1}(i,t)-y && h>pmaxzaehler{2}(i-1,t) &&
         h \leq pmaxzaehler \{2\}(i,t) \& su(i,t) == 0
         untere \{1\}(i, t) = Power(h, t);
         untere \{2\}(i, t)=h;
         untere\{3\}(h,t)=Power(h,t);
         ug(t)=ug(t)+1;
         su(i, t) = 1;
```

```
elseif Power(h-1,t)>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h
                              ,t) && h<pmaxzaehler{2}(i,t) && su(i,t)==0 && h>
                              pmaxzaehler \{2\}(i-1,t)
                              untere \{1\}(i, t) = Power(h, t);
                              untere\{2\}(i,t)=h;
301
                              untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
                          end
306
                     end
                 else
                     if i==1
                          i f
                               h \leq pmaxzaehler \{2\}(i,t) \& su(i,t) == 0 \& Power(h,t)
311
                             ==0 && Power(h+1,t)>0
                              untere \{1\}(i,t)=Power(h,t);
                              untere \{2\}(i, t)=h;
                              untere\{3\}(h,t)=Power(h,t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
316
                          elseif Power(h-1,t)>Power(h,t) && Power(h+1,t)>Power(h
                              ,t) && h<pmaxzaehler{2}(i,t) && su(i,t)==0
                              untere {1}(i,t)=Power(h,t);
                              untere \{2\}(i, t)=h;
                              untere \{3\}(h,t)=Power(h,t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
321
                              su(i, t) = 1;
                          end
                     end
                     if i==q
326
                          if h<pmaxzaehler{2}(i,t) && su(i,t)==0 && h>
                              pmaxzaehler{2}(i-1,t) & Power(h,t)==0 & Power(h
                              +1,t)>0 && su(i,t)==0
                              untere {1}(i,t)=Power(h,t);
                              untere\{2\}(i,t)=h;
                              untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
331
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
```

```
elseif Power(h-1,t)>Power(h,t) & Power(h+1,t)>Power(h
                              ,t) && h<pmaxzaehler{2}(i,t) && su(i,t)==0 && h>
                              pmaxzaehler \{2\}(i-1,t)
                              untere \{1\}(i,t) = Power(h,t);
                              untere\{2\}(i,t)=h;
336
                              untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
                          end
341
                     end
                     if i~=1 && i~=q
                          if h>pmaxzaehler{2}(i-1,t) & h<pmaxzaehler{2}(i,t)
                             && su(i,t)==0 && Power(h+1,t)>0 && Power(h,t)==0 &&
                               pmaxzaehler \{2\}(i,t)-h < xh
                              untere \{1\}(i, t)=Power(h, t);
                              untere \{2\}(i, t)=h;
346
                              untere \{3\}(h, t) = Power(h, t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
                          elseif Power(h+1,t)>Power(h,t) && h<pmaxzaehler{2}(i,t)
                              ) && su(i, t) == 0 && h > pmaxzaehler \{2\}(i-1, t) &&
                              pmaxzaehler{2}(i,t)-h<xh
                              untere \{1\}(i,t) = Power(h,t);
351
                              untere \{2\}(i, t)=h;
                              untere\{3\}(h,t)=Power(h,t);
                              ug(t)=ug(t)+1;
                              su(i, t) = 1;
                          end
356
                     end
                 end
            end
        end
   end
361
    schicht=0;
    spzrim=zeros(1,tmax);
    for t=1:tmax
                    %Kleine unregelmäßigkeiten rausfiltern
        q=size(nonzeros(pmaxzaehler{1}(:,t)),1);
366
        for i = 1:q;
            if (pmaxzaehler{1}(i,t)-untere{1}(i,t)>p && pmaxzaehler{1}(i,t)-
                                      %nur schicht, wenn die obere oder untere
                obere \{1\}(i,t)>p\};
                grenzen mind. p db entfernt sind
```

```
pmax{1}(i,t)=pmaxzaehler{1}(i,t);
                pmax{2}(i,t)=pmaxzaehler{2}(i,t);
                obere1{1}(i,t)=obere{1}(i,t);
371
                obere1{2}(i, t)=obere{2}(i, t);
                untere1{1}(i,t)=untere{1}(i,t);
                untere1\{2\}(i,t)=untere\{2\}(i,t);
                schicht=schicht+1;
                spzrim(1,t)=spzrim(1,t)+1;
376
            end
       end
   end
   for t=1:tmax %maxima in pmaxzaehler schreiben
        q=size((pmax{1}(:,t)),1);
        for i = 1:q;
            for h=1:hmax;
                if h = = pmax\{2\}(i, t);
                    pmax{3}(h, t)=pmax{1}(i, t);
                end
                if h==untere1\{2\}(i,t);
                     untere1\{3\}(h,t)=untere1\{1\}(i,t);
391
                end
                if obere1{2}(i,t)==h;
                     obere1{3}(h,t)=obere1{1}(i,t);
                end
396
            end
       end
   end
   dicke=zeros(q,tmax);
   %Berechnen der höhe der Schichten
                   %dicke berechnen als Delta dicke der höhenkanäle
   for t=1:tmax
        q=size(nonzeros(obere1{1}(:,t)),1);
406
        for i = 1:q;
            dicke(i,t)=obere1{2}(i,t)-untere1{2}(i,t);
        end
   end
```

```
abstand=zeros(q,tmax);
for t=1:tmax
    q=size(nonzeros(obere1{1}(:,t)),1)-1;
    for i=1:q;
        abstand(i,t)=pmax{2}(i+1,t)-pmax{2}(i,t);
    end
end
```

B.2. Zeitliche Analyse

Matlab-Code für die Analyse der zeitlichen Dauer für beide Verfahren

```
1
  clear all;
   close all;
  load ('prim.mat') %laden der höhen-zeit-matrix mit maxima=1, andere werte=0
6 pklassisch=prim;
  hmax=size(pklassisch,1);
  tmax=size(pklassisch,2);
   hgrenze=20;
  smatrix=zeros(hmax,tmax);
11
   for h1=hgrenze+1:hmax-hgrenze
       for t1=2:tmax
        s = 0:
           for h2=-hgrenze:hgrenze
                   if pklassisch (h1+h2,t1-1)==1 %Startpunkt von Schicht
                       finden
                        s=s+1;
                   end
               end
21
           if s==0 && pklassisch(h1,t1)==1
               smatrix(h1,t1)=1;
           end
26
       end
```

```
end
   t = 1;
   for h=1:hmax
        if pklassisch(h,t)==1
31
               smatrix(h,t)=1;
        end
   end
   zeit=zeros(hmax,tmax); %matrix, bei denen an die startpunkte die zeitliche
36
       dauer der schicht geschrieben werden soll
   schicht=zeros(hmax,tmax);
   for h=hgrenze+1:hmax-hgrenze
       for t=1:tmax
           hx=0;
            if smatrix(h,t)==1
41
                hx=h;
                x = 1;
                zeit(h,t)=1;
                q=0;
                while q==0
                    r = 0;
                for h1=-hgrenze:hgrenze
                    if t+x<=140
                    if pklassisch(hx+h1,t+x) = = 1
51
                        schicht(hx+h1,t+x)=1;
                         zeit(h,t)=zeit(h,t)+1;
                        hx=hx+h1;
                        x = x + 1;
                        r=r+1;
56
                    end
                    end
                end
                if r = = 0
61
                    q=1;
                end
                end
           end
       end
   end
66
   zeit=nonzeros(zeit);
   zeit=zeit(find(zeit>1));
   zeitzahl=histc(zeit,x1); %Statistische Auswertung
```

Literaturverzeichnis

- W. K. Hocking. What the radar sees. In *Third international school on atmospheric radar*, 2002a.
- W. K. Hocking. What causes the scattering and reflecting irregularities? In *Third international school on atmospheric radar*, 2002b.
- R. D. Palmer, M. F. Larsen, C. J. Heinselman, and I. S. Mikkelsen. Frequency domain interferometry using the 1290-mhz sondre stromfjord radar: first results. *Journal of Atmospheric an Oceanic Technology*, 10:618–623, 1993.
- R. D. Palmer, T.-Y. Yu, and P. B. Chilson. Range imaging using frequency diversity. *Radio Science*, 34:1485–1496, 1999.
- J. Röttger. The mst radar technique. In Handbook for MAP, Volume 13, 1984.
- Vaisala group. Datenblatt vaisala radiosonde rs92. http://www.vaisala.com/files/ RS92SGP-Datasheet-B210358EN-E.pdf. [Online; abgerufen 05. August 2010].

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, 17.08.2010