

WESTFÄLISCHE  
WILHELMS-UNIVERSITÄT  
MÜNSTER



# **Trendanalyse von Temperaturen in verschiedenen Höhen: Gibt es eine Erwärmung der Troposphäre über Neumayer, Antarktis?**

Trend Analysis of Temperatures at Different Altitudes: Is there a Tropospheric  
Warming above Neumayer, Antarctica?

**Bachelorarbeit**

im Studiengang Landschaftsökologie

vorgelegt von

Stefanie Küpperbusch

**Erstprüfer:** Prof. Dr. Otto Klemm

**Zweitprüferin:** Elisa Fleischer, M. Sc.

Oktober 2015



## Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>1</b>
<b>1 Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>3</b>
2.1 Untersuchungsgebiet .....	3
2.2 Klimatologie .....	4
2.3 Neumayer-Stationen.....	4
2.4 Radiosondierungen .....	5
2.5 Datenaufbereitung und statistische Analyse .....	6
<b>3 Ergebnisse.....</b>	<b>7</b>
3.1 Trendanalyse.....	7
3.2 Prüfung der Temperaturveränderung.....	9
<b>4 Diskussion.....</b>	<b>12</b>
<b>5 Fazit und Ausblick.....</b>	<b>14</b>
<b>6 Dank .....</b>	<b>15</b>
<b>7 Literaturverzeichnis.....</b>	<b>16</b>
<b>8 Schlusserklärung zur Autorenschaft .....</b>	<b>18</b>
<b>9 Anhang .....</b>	<b>19</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>ANOVA</b>	Analysis of Variance
<b>AWI</b>	Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung
<b>GTS</b>	Global Telecommunication System
<b>MSU</b>	Microwave Sounding Unit
<b>PANGEA</b>	Data Publisher for Earth and Environmental Science
<b>SAM</b>	Southern Annual Mode
<b>TEMP</b>	Vertikalprofil, Darstellung der Lufttemperatur, Taupunkttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung in Abhängigkeit von der Höhe
<b>UTC</b>	Coordinated Universal Time
<b>üNN</b>	über Normal Null
<b>WMO</b>	World Meteorological Organization

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Positionskarte Neumayer Station III. (Foto: Kartenbasis: Wikimedia / Nasa)(Quelle AWI o.J.a).....	3
Abbildung 2: Ballonstart vom Dach der Neumayer III-Station (Quelle: AWI o.J.c).....	5
Abbildung 3: Jahresmittel der Temperaturen aller Hauptdruckflächen von 1983 – 2014.....	7
Abbildung 4: Trendlinien der Hauptdruckflächen A. 300 hPa, B. 400 hPa, C. 500 hPa, D. 750 hPa, E. 850 hPa sowie der F. Bodenwerte (40 m üNN).....	8
Abbildung 5: Änderung der Jahresmitteltemperaturen und Standardabweichung für jede Hauptdruckfläche von 1983 - 2014. Nur der Wert der Hauptdruckfläche 300 hPa zeigt eine signifikante Temperaturveränderung. ....	9
Abbildung 6: Änderung der Temperatur und Standardabweichung der Sommer- und Wintermittel für jede Hauptdruckfläche von 1983 – 2014. Nur die Werte der Hauptdruckflächen 300 hPa bis 700 hPa der Sommermonate zeigen eine signifikante Temperaturveränderung. ....	11

**Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1: Durchschnittliche Höhe der verschiedenen Hauptdruckflächen in der Troposphäre .....	6
Tabelle 2: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA für die Jahresmittel nach Hauptdruckflächen. ....	9
Tabelle 3: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA der mittleren Sommer- und Wintertemperaturen nach Hauptdruckflächen. ....	10
Tabelle 4: Signifikante Temperaturabnahmen aller Hauptdruckflächen in °C im antarktischen Sommer von 1983 bis 2014. ....	10

## Zusammenfassung

Für die Analyse der Temperaturtrends in verschiedenen Höhen dienen die Daten der täglichen Radiosondenaufstiege von 1983 bis 2014 über den Neumayer-Stationen auf dem Ekström-Schelfeis im nördlichen Teil der Antarktis. Die Trendanalyse erfolgte mittels einfaktorieller ANOVA und ergab, dass sich ein negativer Trend einstellt. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen im antarktischen Sommer (Oktober – März) in der Troposphäre für die Hauptdruckfläche 300 hPa eine hoch signifikante Temperaturabnahme und in den Hauptdruckflächen 400 hPa, 500 hPa und 700 hPa eine signifikante Temperaturabnahme. Die analysierte Abkühlung steigt mit zunehmender Höhe, also mit geringerer werdender Hauptdruckfläche. Die Temperaturabnahme beträgt in der Hauptdruckfläche 700 hPa -0,87 °C und in der Hauptdruckfläche 300 hPa -1,49 °C. Die im antarktischen Winter (April – September) gemessenen Werte zeigen eine nicht-signifikante Temperaturabnahme.

## 1 Einleitung

Der Klimawandel ist in den letzten Jahren zunehmend in den Fokus der Wissenschaft, Politik und Gesellschaft gerückt. Die Erwärmung des globalen Klimasystems ist seit 1950 im Vergleich zu vorherigen Jahrzehnten verstärkt. Die Atmosphäre und der Ozean weisen eine Temperaturerhöhung auf, die Schnee- und Eismassen nehmen ab und der Meeresspiegel steigt an (IPCC Climate Change Synthesis Report, 2014).

Trotz vielfältiger erfolgreicher Forschung bleiben große Unsicherheiten in Bezug auf die Ursachen und Auswirkungen des Klimawandels. Besonders die Polarregionen scheinen stark betroffen zu sein und erweisen sich gleichzeitig als vielversprechende Indikatorregionen für derzeitige und zukünftige Klimaveränderungen. Die Wissenschaft beschäftigt sich in der Antarktis intensiv mit der Erforschung der physikalischen und chemischen Prozesse der Atmosphäre und die gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean und Eis (Turner et al., 2015).

In diesem Zusammenhang werden auch Langzeitbeobachtungen von Temperatur, Luftfeuchte, Luftdruck und Wind sowohl am Boden als auch in der höheren Atmosphäre durchgeführt. Sie geben Aufschluss über die Klimabedingungen und deren Variabilität in der Vergangenheit und ermöglichen es, Projektionen für die Zukunft zu erstellen (Johnson und Fu, 2007).

Zahlreiche Studien belegen einen Temperaturanstieg an den Klimastationen in weiten Teilen der Erde (IPCC Climate Change Synthesis Report, 2014) und auch für einige antarktische Stationen wurde bereits ein Trend der Erwärmung festgestellt (Chapman et al., 2005).

Das Alfred-Wegener Institut (AWI), Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, betreibt seit 1981 Forschung in der Antarktis. Obwohl in der aktuellen Neumayer-Station III und deren Vorläuferstationen (Georg von Neumayer und Neumayer II) bereits seit 1983 täglich Radiosondierungen zur Erkundung unter anderem des Temperaturhöhenprofils durchgeführt werden (König-Langlo und Loose, 2007), gibt es bislang keine Auswertung der Trends der Lufttemperatur im Höhenprofil der Troposphäre. Ziel dieser Arbeit ist es, die Temperaturen in unterschiedlichen Höhen innerhalb der Troposphäre von 1983 bis 2014 zu analysieren. Gibt es signifikante Trends? Kann auch über den Neumayer-Stationen eine Erwärmung der Troposphäre festgestellt werden?

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Untersuchungsgebiet

Das Gebiet der Antarktis, einschließlich des Kontinents Antarktika, deren Eisschelfe und die durch diese verbundenen Inseln, hat eine Größe von etwa 14 Millionen km<sup>2</sup>. Die Antarktis wird in Ostantarktis und Westantarktis gegliedert und ist in ihrer Gesamtheit nahezu komplett mit Schnee und Eis bedeckt. Eisfreie Flächen finden sich überwiegend im Transantarktischen Gebirgszug. Neunzig Prozent der Eisvorräte der gesamten Erde befinden sich in der Antarktis. Deswegen ist dieser Kontinent das größte Süßwasserreservoir der Erde. Umgeben wird die Antarktis von dem Zirkumpolarstrom, der als der größte Meeresstrom der Welt gilt (Roland, 2003).

Die deutsche Forschungsstation Neumayer III, mit den Koordinaten 70°40'S, 008°16'W, befindet sich im Norden der Ostantarktis auf dem Ekström-Schelfeis an der Atka-Bucht am nordöstlichen Weddell-See (Abb. 1). Das Ekström-Schelfeis hat eine Fläche von 8700 km<sup>2</sup> und zählt mit seiner Größe eher zu den kleineren Schelfeisgebieten in der Antarktis. Das Schelfeis hat am Stationsort eine Dicke von 230 m und fließt mit einer Geschwindigkeit von ca. 160 bis 200 m im Jahr Richtung Norden. Die Atka-Bucht bildet im überwiegenden Teil des Jahres, von Ende Februar bis Dezember, eine Eisdicke von bis zu 2 m, bis die Eisflächen gegen Ende Dezember wieder aufbrechen (Enss, 2004).

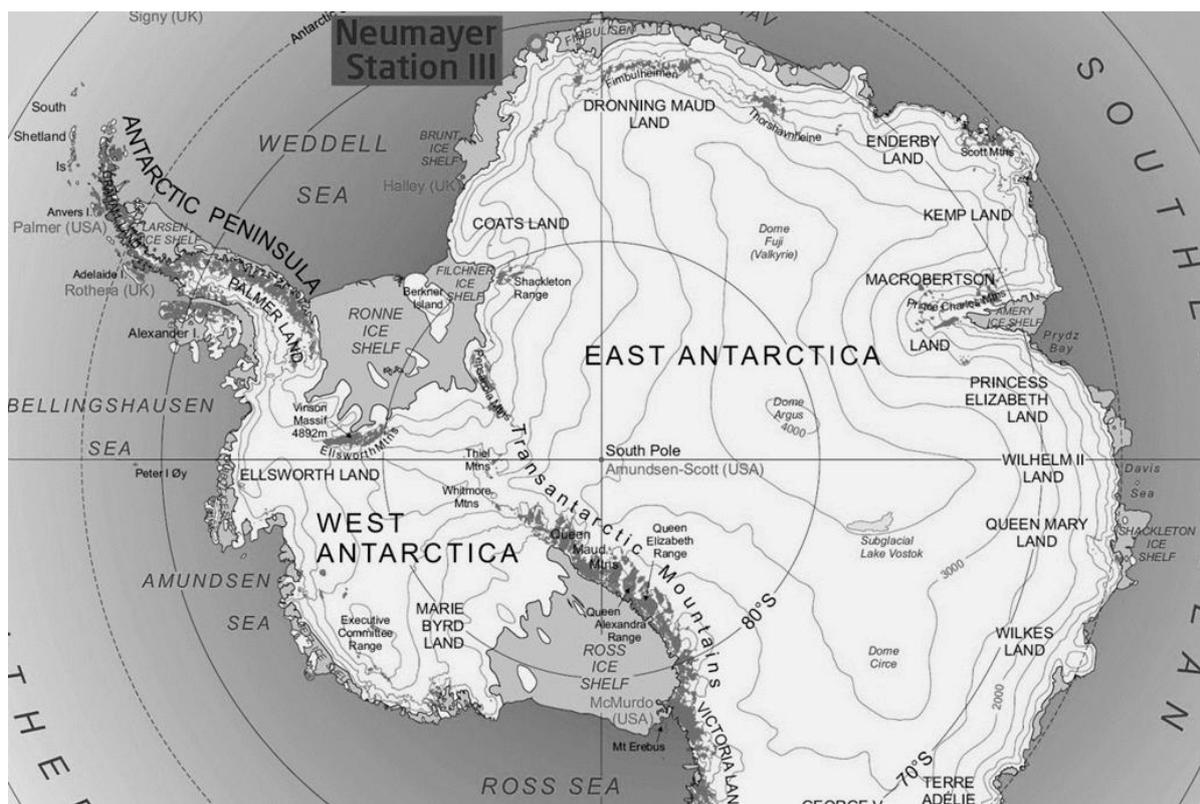


Abbildung 1: Positionskarte Neumayer Station III. (Foto: Kartenbasis: Wikimedia / Nasa)(Quelle AWI o.J.a)

## 2.2 Klimatologie

Die Antarktis ist ein Kontinent der Superlative. Sie ist der kälteste, windigste und trockenste Kontinent der Erde (König-Langlo und Loose, 2007) und spielt vor allem deswegen eine wichtige Rolle im globalen Klimasystem.

Bedeutsame Änderungen klimatologischer Bedingungen sind auf den Wechsel von Polartag und Polarnacht im antarktischen Sommer und Winter zurückzuführen. Die Sonne geht im Winter (April – September) nicht auf und es herrscht vom 19. Mai bis 27. Juli Polarnacht. Im Sommer (Oktober bis März) geht die Sonne nicht unter und es herrscht vom 19. November bis 24. Januar Polartag (König-Langlo und Loose, 2007).

Der geringe Eintrag von Strahlungsenergie, dadurch dass die solare Strahlung nur flach auf die Schnee- und Eisoberfläche trifft, verursacht die niedrigen Temperaturen. Die Sonnenstrahlen werden wegen des hohen Reflektionsvermögens (Albedo) direkt wieder in die Atmosphäre zurückgestrahlt. Die Höchsttemperatur im Sommer beträgt  $-30\text{ °C}$  auf dem antarktischen Plateau und  $-4\text{ °C}$  in den Küstenregionen. Die Minimaltemperatur im Juli und August beträgt  $-70\text{ °C}$  auf dem Plateau und  $-25\text{ °C}$  an der Küste. Die niedrigste jemals gemessene Temperatur wurde an der russischen Forschungsstation Vostok im Juli 1983 gemessen und betrug  $-89,5\text{ °C}$  (Bargagli, 2005).

Die Temperaturunterschiede zwischen Äquator und Südpol treiben die Dynamik der Atmosphäre und des Ozeans an (Yuan et al. 1996). Die Schwankung des Luftdruckgradienten durch das Zusammentreffen der warmen Luft aus den Tropen und der kalten Luft über der Antarktis beeinflusst die Temperatur und entwickelt starke Westwinde zwischen den Breitengraden, die den Kontinent einkreisen. Zusätzlich beeinflussen die katabatischen Winde das Klima über dem Südpol. Dieser katabatische Wind ist ein Fallwind und entsteht durch einen Druckausgleich verursacht durch den Dichteunterschied von kalter Luft in höheren Lagen und warmer Luft an der Küste. Schneeverwehungen, Schneestürme und Schneegestöber sind Hauptursachen des katabatischen Windes (Bargagli, 2005).

## 2.3 Neumayer-Stationen

Die erste deutsche Forschungseinrichtung für die Antarktisforschung, die Georg-von-Neumayer Station, ist 1981 in Betrieb genommen worden. Der Standort dieser unterirdisch gebauten Forschungsstation bewegt sich fortwährend mit dem Schelfeis in Richtung Abbruchkante in der Atka-Bucht, was in Zukunft zu einer Zerstörung dieser Station führen wird. Zusätzlich begrenzt die zunehmende Schneelast auf der Station die Lebensdauer des Gebäudes. Aus diesen Gründen wurde die Forschungseinrichtung bereits zweimal durch weiter südlich gelegene Bauten ersetzt, zuerst im Jahr 1992 durch die Neumayer II-Station und zuletzt im Jahr 2009 durch die aktuelle Neumayer III-Station (Enss, 2004).

Die meteorologischen Observatorien liefern seit 1981 kontinuierlich Daten, um „die Lücken im globalen Wetter- und Klimabeobachtungsnetz zu schließen“ (König-Langlo und Loose, 2007). Die hier erhobenen meteorologischen Parameter werden in internationale Monitoring-Netzwerke

eingebunden und archiviert. Bodennahe Strahlungsmessungen, synoptische Wetterbeobachtungen, tägliche Radiosondierungen und wöchentliche Ozonsondierungen machen den Hauptteil der Messungen an der Neumayer III aus (AWI o.J.b). Diese Messungen „stellen einen bedeutenden Beitrag für das Verstehen der jüngeren regionalen und globalen Klimaveränderungen dar“ (Enss, 2004).

## 2.4 Radiosondierungen

Mittels Radiosondenaufstiegen erfolgen Messungen von Klimaelementen und atmosphärischen Bedingungen bis in Höhen von etwa 35 km. Hierbei steigt ein mit Helium gefüllter Ballon mit einer Geschwindigkeit von 5 m / s bis zu einer Höhe von 35 km auf bis er platzt (Abb. 2). Dabei erfassen die an dem Ballon befestigten Messgeräte Temperatur, Luftdruck, Wind und relative Luftfeuchte, die im 5-Sekunden-Takt an die Bodenstation gefunkt werden. Die so gewonnen Daten dienen dazu, ein Vertikalprofil der Atmosphäre (TEMP) zu erstellen. Alle seit 1983 täglich erfassten Daten werden unverzüglich an das Global Telecommunication System (GTS) gesendet und in PANGEA (Data Publisher for Earth & Environmental Science) veröffentlicht (König-Langlo und Loose, 2007).



**Abbildung 2: Ballonstart vom Dach der Neumayer III-Station (Quelle: AWI o.J.c)**

Radiosondenaufstiege werden weltweit von verschiedensten Wetter- und Forschungsstationen durchgeführt. Um die Auswertungen zu standardisieren, hat die World Meteorological Organization (WMO) Hauptdruckflächen festgelegt. Diese Hauptdruckflächen entsprechen jeweils durchschnittlichen Höhen in der Atmosphäre (Tab. 1). Die Verwendung der Druckflächen anstatt von Höhenangaben wurde festgelegt, weil der Luftdruck der mit der Sonde direkt gemessene Parameter

ist und die Ableitung der Höhenangabe aus dem Luftdruck je nach Temperaturprofil zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. In dieser Arbeit werden von den Stationen Georg-von-Neumayer, Neumayer II und Neumayer III ausschließlich Daten der Hauptdruckflächen der Troposphäre (850 hPa, 700 hPa, 500 hPa, 400 hPa und 300 hPa), sowie die Bodenwerte (40 m üNN) von 1983 bis 2014 untersucht.

**Tabelle 1: Durchschnittliche Höhe der verschiedenen Hauptdruckflächen in der Troposphäre**

Hauptdruckflächen [hPa]	Boden	850	700	500	400	300
Mittlere Höhe [m]	40	1140	2595	5014	6535	8399

## 2.5 Datenaufbereitung und statistische Analyse

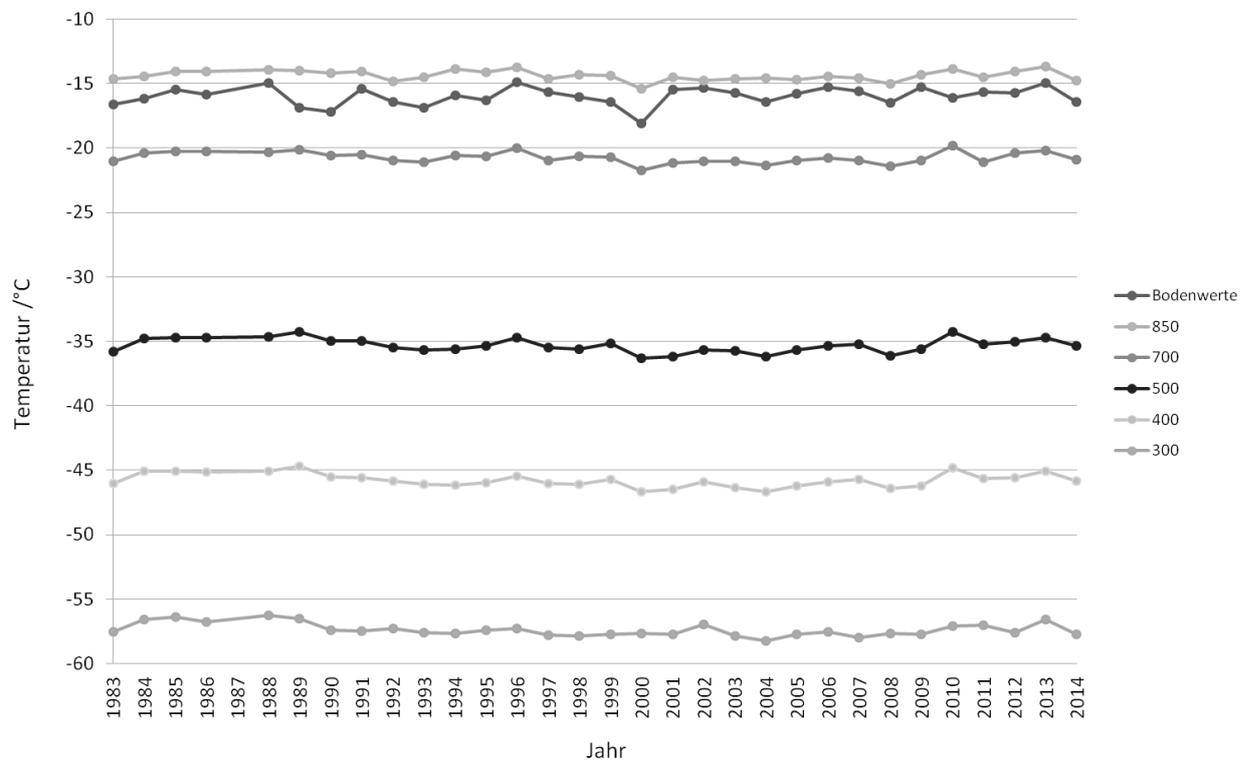
Um möglichst belastbare Aussagen über die Analyse der Temperaturtrends zu treffen, wurde das längst-mögliche Zeitfenster der vorliegenden Daten (1983 - 2014) gewählt. Da die täglichen Radiosondenaufstiege in diesem Bereich nicht immer zur selben Uhrzeit erfolgten, beschränken sich die Temperaturanalysen auf 9, 10 und 11 UTC Startzeit.

Zur statistischen Analyse wurde der Test auf Normalverteilung durchgeführt. Alle Datensätze erfüllen die Voraussetzungen der Normalverteilung für parametrische Tests, weshalb zur Datenauswertung Mittelwerte und andere parametrische Angaben für die Charakterisierung der Temperaturverläufe verwendet werden konnten. Die Temperaturen wurden jährlich, monatlich, sowie jeweils für den antarktischen Sommer und Winter gemittelt. Für das Jahr 1987 liegen aufgrund technischer Ausfälle keine Daten vor.

Die Trendanalysen erfolgten mittels Regressionsgeraden. Um die Beziehungen zwischen der unabhängigen Variable (Datum) und der abhängigen Variable (Mittelwert der Temperatur) festzustellen, wurden Regressionsanalysen (einfaktorielle ANOVA) erzeugt, die zeigen, ob sich ein positiver oder negativer Trend einstellt.

### 3 Ergebnisse

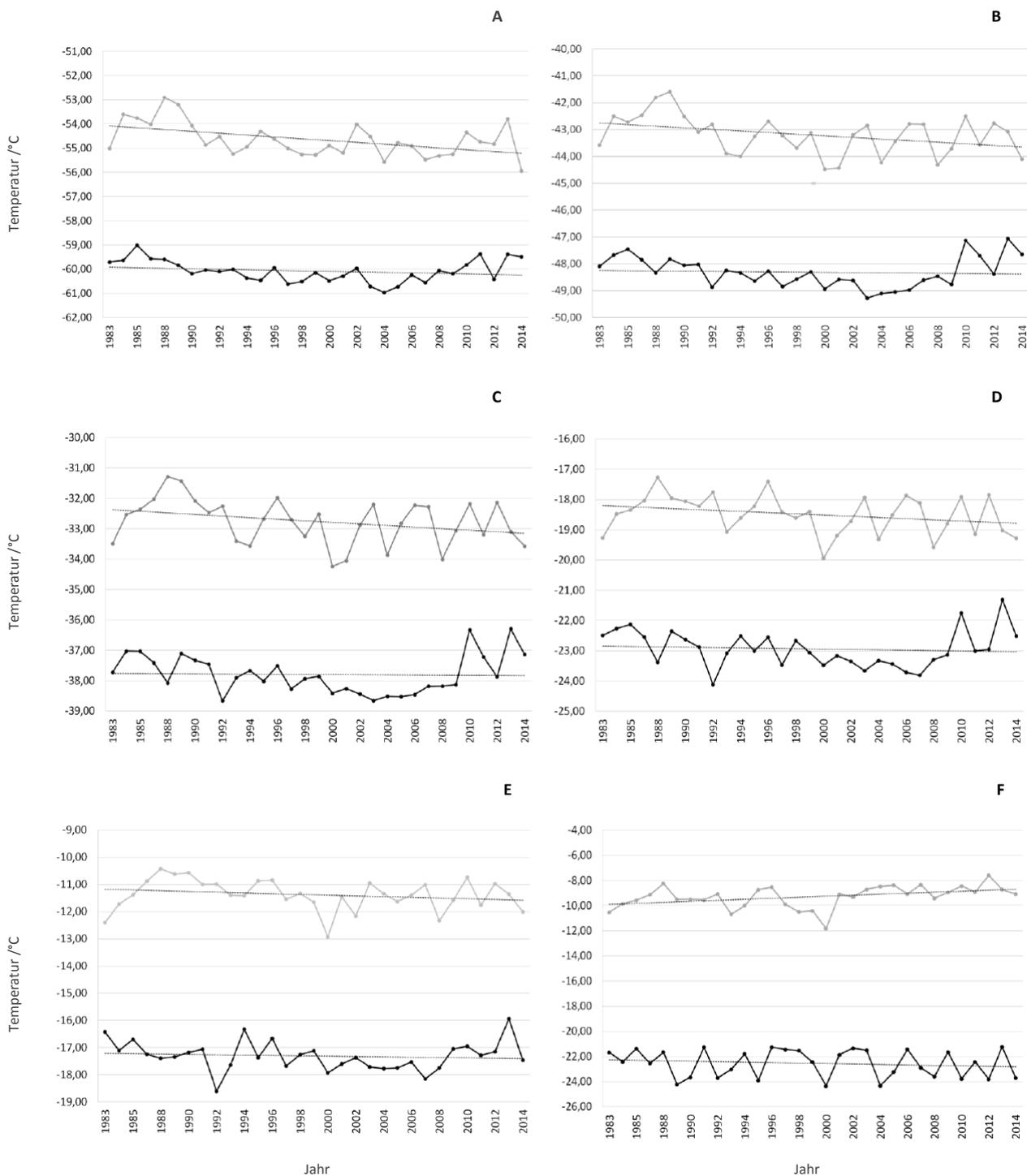
#### 3.1 Trendanalyse



**Abbildung 3: Jahresmittel der Temperaturen aller Hauptdruckflächen von 1983 – 2014**

Die Temperaturen aller Hauptdruckflächen liegen zwischen  $-13,0\text{ °C}$  (850 hPa) und  $-58,0\text{ °C}$  (300 hPa), wobei die Temperatur mit Abnahme des Drucks der jeweiligen Hauptdruckfläche und somit mit steigender Höhe sinkt.

Abbildung 4 zeigt die Änderungen der Temperaturen in den verschiedenen Höhen (Hauptdruckflächen) getrennt nach antarktischem Sommer und Winter.



**Abbildung 4: Trendlinien der Hauptdruckflächen A. 300 hPa, B. 400 hPa, C. 500 hPa, D. 750 hPa, E. 850 hPa sowie der F. Bodenwerte (40 m üNN). — Sommer — Winter**

Die Temperaturen im antarktischen Winter sind deutlich niedriger als die Temperaturen im antarktischen Sommer. Die Abbildungen deuten auf einen negativen Trend des Temperaturverlaufs der antarktischen Sommer hin. Auch bei näherer Betrachtung der Trends in den vier Jahreszeiten (Sommer, Frühling, Herbst und Winter) der jeweiligen Hauptdruckflächen von 1893 bis 2014 zeigen diese einen negativen Trend (Abbildungen A.1 – A.6 im Anhang).

### 3.2 Prüfung der Temperaturveränderung

Mithilfe einer einfaktoriellen ANOVA wurde die Signifikanz der Temperaturänderungen für jede Hauptdruckfläche sowohl für die Jahresmittel als auch für die Sommer- und Wintermittel berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

**Tabelle 2: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA für die Jahresmittel nach Hauptdruckflächen.**

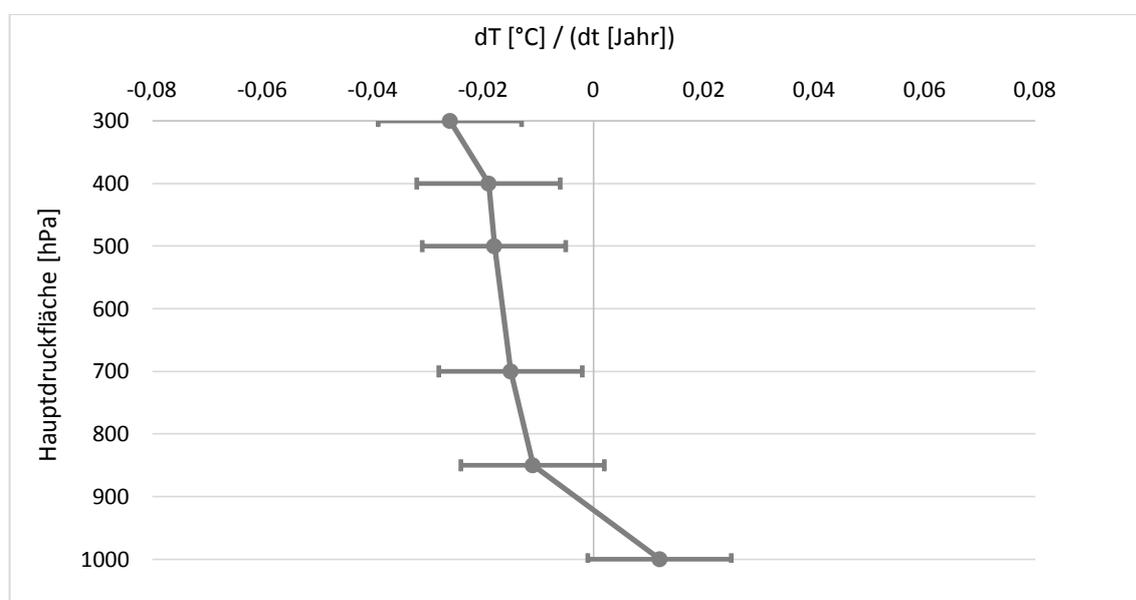
Hauptdruckfläche [hPa]	p-Wert	Temperaturänderung [ $^{\circ}\text{C Jahr}^{-1}$ ]
300	0,012	-0,026*
400	0,085	-0,019
500	0,123	-0,018
700	0,102	-0,015
850	0,217	-0,011
Boden (40m üNN)	0,435	0,012

\*signifikant ( $p < 0,05$ )

\*\*signifikant ( $p < 0,01$ )

Die Hauptdruckfläche 300 hPa zeigt eine signifikante Temperaturabnahme von  $-0,026^{\circ}\text{C}$  pro Jahr. Demnach sank über dem gesamten Messzeitraum von 1983 bis 2014 die Temperatur in der Hauptdruckfläche 300 hPa um  $-0,83^{\circ}\text{C}$ .

Abbildung 10 zeigt die absolute Veränderung der Jahresmitteltemperatur für jede Hauptdruckfläche von 1983 bis 2014. Bis auf die Bodenwerte verzeichnen alle Änderungen der Jahresmitteltemperaturen negative Werte. Zusätzlich ist eine negative Korrelation der Temperaturänderung mit der Höhe zu erkennen.



**Abbildung 5: Änderung der Jahresmitteltemperaturen und Standardabweichung für jede Hauptdruckfläche von 1983 - 2014. Nur der Wert der Hauptdruckfläche 300 hPa zeigt eine signifikante Temperaturveränderung.**

Die Betrachtung der in Tabelle 3 dargestellten Temperaturveränderung getrennt nach antarktischem Sommer und Winter zeigt für alle Hauptdruckflächen, ausgenommen die Bodenwerte im Sommer, eine Temperaturabnahme. Allerdings ist eine signifikante Veränderung der Temperaturen nur in den oberen vier Hauptdruckflächen (700 bis 300 hPa) in den Sommermonaten gegeben.

**Tabelle 3: Ergebnisse der einfaktoriellen ANOVA der mittleren Sommer- und Wintertemperaturen nach Hauptdruckflächen.**

Hauptdruckfläche [hPa]	p-Wert		Temperaturänderung [ $^{\circ}\text{C Jahr}^{-1}$ ]	
	Sommer	Winter	Sommer	Winter
300	0,002	0,300	-0,044**	-0,010
400	0,019	0,707	-0,035*	-0,005
500	0,034	0,821	-0,033*	-0,003
700	0,043	0,742	-0,027*	-0,004
850	0,066	0,901	-0,021	-0,001
Boden (40m üNN)	0,051	0,535	0,035	-0,014

\*signifikant ( $p < 0,05$ )

\*\*signifikant ( $p < 0,01$ )

Mit einem Signifikanzniveau von  $p < 0,01$  ist eine hoch signifikante Temperaturveränderung in der Hauptdruckfläche 300 hPa nachgewiesen worden. Die Temperaturveränderung der Hauptdruckflächen 400 hPa, 500 hPa und 700 hPa ist mit  $p < 0,05$  signifikant.

Tabelle 4 zeigt die absoluten Temperaturabnahmen in den antarktischen Sommern. Mit zunehmender Höhe über Grund und damit mit der Abnahme des atmosphärischen Druckes ist ein stärkeres Sinken der Temperatur zu verzeichnen. So sinkt die Temperatur bei 700 hPa  $-0,87^{\circ}\text{C}$ , während die Abnahme der Temperatur bei 300 hPa  $-1,41^{\circ}\text{C}$  beträgt.

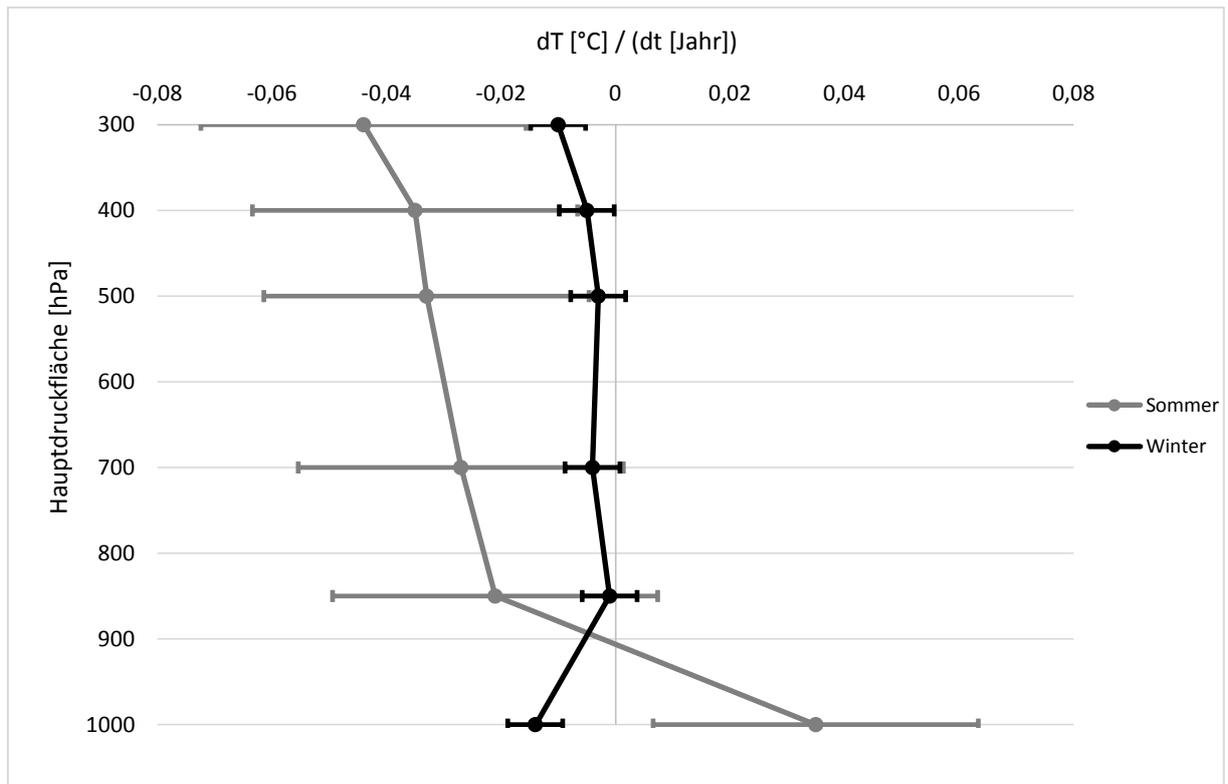
**Tabelle 4: Signifikante Temperaturabnahmen aller Hauptdruckflächen in  $^{\circ}\text{C}$  im antarktischen Sommer von 1983 bis 2014.**

Hauptdruckfläche [hPa]	300	400	500	700
Temperaturänderung [ $^{\circ}\text{C (32 Jahre)}^{-1}$ ]	-1,41**	-1,12*	-1,06*	-0,87*

\*signifikant ( $p < 0,05$ )

\*\*signifikant ( $p < 0,01$ )

Abbildung 11 zeigt die absoluten Temperaturänderungen von 1983 bis 2014 nach Sommer und Winter getrennt. Während die Werte des antarktischen Sommers mit der Höhe auf eine Temperaturabnahme hinweisen, ist für die Wintermonate keine entsprechende höhenabhängige Temperaturentwicklung zu erkennen. Die Bodenwerte des Winters sind im Gegensatz zu denen des Sommers unter  $0^{\circ}\text{C}$ , sind jedoch nicht signifikant. Besonders die Unterschiede am Boden zwischen Sommer und Winter sind auffällig.



**Abbildung 6:** Änderung der Temperatur und Standardabweichung der Sommer- und Wintermittel für jede Hauptdruckfläche von 1983 – 2014. Nur die Werte der Hauptdruckflächen 300 hPa bis 700 hPa der Sommermonate zeigen eine signifikante Temperaturveränderung.

## 4 Diskussion

Bei der Betrachtung der jährlichen Entwicklung der Temperaturen in der Troposphäre zeigt sich, dass es signifikante Änderungen gibt. Bei näherer Betrachtung der Monatsmittel werden erhebliche Änderungen deutlich. Durch die Unterteilung der einzelnen Hauptdruckflächen nach antarktischen Sommer und Winter konnte auch hier ein Vergleich gezogen und Unterschiede festgestellt werden. Die Trendlinien zeigen insbesondere im antarktischen Sommer eine eindeutig negative Steigung. In der hoch signifikanten Hauptdruckfläche 300 hPa im antarktischen Sommer kann man zu 99 % Sicherheit sagen, dass es zu einer Abkühlung kommt. In den Hauptdruckflächen 400 hPa, 500 hPa und 700 hPa besteht eine 95%-Sicherheit, dass es zu einer Abkühlung kommt. Die Temperaturänderung im antarktischen Winter verzeichnet in allen Hauptdruckflächen eine negative Steigung der Regressionsgeraden, welche allerdings durchweg nicht signifikant sind.

Thompson und Solomon (2002) befassen sich mit der Interpretation der Klimaveränderungen der Südhemisphäre und greifen auf, dass die Klimavariabilität in den höheren Breiten der Südhemisphäre durch das SAM (Southern Annular Mode)<sup>1</sup>, beschrieben wird. Es wurde festgestellt, dass sich der heutige Trend in die Richtung einer High Index Polarität entwickelt, was bedeutet, dass kalte Temperaturen vorherrschen, die Hauptdruckflächen über der Polarkappe gering sind und starke Westwinde den Südpol umkreisen. Außerdem wird argumentiert, dass es durch die Veränderung des stratosphärischen Wirbels, welche auf den Ozonabbau zurückzuführen ist, auch zu Veränderungen im troposphärischen Trend kommt. Dieser Trend zeigt eine deutliche Abkühlung, welche sich im antarktischen Sommer und Herbst zeigt. Der dort vorherrschende starke zirkumpolare Fluss trägt stark zu einer Erwärmung über der antarktischen Halbinsel und Patagonien, jedoch aber zu einer Abkühlung über der Ostantarktis und dem antarktischen Plateau bei. Die von Thompson und Solomon (2002) analysierten Daten zeigen, dass es im antarktischen Sommer seit 1979 zu einer Abkühlung kam. Für diese Analyse wurden die Daten von sieben Forschungsstationen<sup>2</sup> näher betrachtet, wovon vier Stationen auch Turner et al. (2006) verwendeten. Hier werden die Daten von Neumayer nicht betrachtet. Der Befund, dass es zu einer Abkühlung kommt deckt sich jedoch mit dem Ergebnis dieser Arbeit und unterstützt diese dadurch. Dass es zu einer Abkühlung in der Stratosphäre kommt wurde in vielen Studien nachgewiesen (Randel und Wu 1999, Ramaswamy et al. 2001, Screen und Simmonds 2012), welche wie bei Thompson und Solomon (2002) in Verbindung mit dem Ozonabbau gebracht wird. Die Intensität des Polarwirbels hat Einfluss auf die Abkühlung durch den geringeren dynamischen Transport von Ozon aus der tropischen, photochemischen Quellregion (Randel und Wu 1999).

Zu einem unterschiedlichen Ergebnis bezüglich der Temperaturänderung in der Troposphäre über der Antarktis gelangen beispielsweise Turner et. al (2006). Die Autoren legen in dem Artikel „Significant Warming of the Antarctic Winter Troposphere“ nahe, dass es laut einer Analyse der

---

<sup>1</sup> Langzeitmodell welches durch die Variabilität der Fluktuation und der Stärke des zirkumpolaren Wirbels charakterisiert wird

<sup>2</sup> Sanae, Halley, Syowa, Molodeznaja, Davis, Mirnyj, Casey

Temperaturen in der Troposphäre, gemessen durch Radiosondierungen von 1979 bis 2005, zu einer Erwärmung kommt. Um zu dieser Aussage zu gelangen, wurden die Messdaten von neun Stationen<sup>3</sup> in der Antarktis, die sich überwiegend an der Küste befinden, verwendet. Auch hierbei wurde Neumayer aus nicht bekannten Gründen außer Acht gelassen. Außerdem ist anzumerken, dass Turner et al. (2006) sich überwiegend auf die Temperaturen im antarktischen Winter beziehen. Turner et al. (2006) verzeichnen zwischen 1971 und 2003 eine durchschnittliche Temperaturerhöhung um 0,7 °C pro Jahrzehnt in den Hauptdruckflächen 400 bis 600 hPa. Zwischen den Hauptdruckflächen 300 bis 850 hPa stellen sie einen mittleren Temperaturtrend von 0,43 °C pro Jahrzehnt für die neun Stationen fest. Für den antarktischen Sommer gibt es in der Publikation von Turner et al. (2006) keine Analyse. Screen und Simmonds (2012) erweiterten den von Turner et al. (2006) betrachteten Zeitraum um 17 Jahre (1961 – 2010). Durch die Vergrößerung des Zeitraums reduzierte sich die winterliche Erwärmung um 40 %, die sommerliche Erwärmung stieg allerdings um 0,1 °C pro Jahrzehnt und wurde statistisch signifikant. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass es im Winter und Frühling zu einer starken Erwärmung im westlichen Teil der Antarktis kommt, was auf die tropischen Ozeanströmungen zurückgeführt wurde. Insgesamt unterstützt die Studie von Screen und Simmonds (2012) die Ergebnisse von Turner et al. (2006), da ebenfalls eine Erwärmung der mittleren Troposphäre festgestellt wurde. Bei den Analysen der Ergebnisse der Station Novolazarevskaya, welche der Neumayer-Station am nächsten liegt, konnte allerdings keine signifikante Erwärmung in der Troposphäre nachgewiesen werden. Auch dies ist ein Indiz für die regional starke Variabilität.

Regionale Unterschiede können bei den Temperaturänderungen in der Troposphäre eine große Rolle spielen und bewirken dadurch unterschiedliche Ergebnisse der verschiedenen Stationen in der Antarktis. Die Höhe der Windgeschwindigkeit in der Troposphäre sowie auch die Meeresströmungen und sich darüber bildende Hoch- und Tiefdruckgebiete (subpolares Tiefdruckgebiet, in den mittleren Breiten Hochdruckgebiet) beeinflussen die Temperatur. Das Zusammenspiel der enormen Temperaturänderungen und dadurch entstehende Druckunterschiede zwischen kalten und warmen Luftmassen über dem antarktischen Kontinent entwickeln starke Westwinde (McKnight und Hess, 2009). Diese sind vor allen Dingen über Neumayer in den Hauptdruckflächen über 500 hPa präsent (König-Langlo und Loose, 2007).

---

<sup>3</sup> Bellingshausen, Halley, Novolazarevskaya, Syowa, Davis, Mirny, Casey, McMurdo, Amundsen-Scott

## 5 Fazit und Ausblick

Diese Studie zeigt, dass es im antarktischen Sommer in der Troposphäre, über den Neumayer-Stationen von 1983 bis 2014, mit großer Wahrscheinlichkeit zu einer Abkühlung gekommen ist. Warum es zu einer Abkühlung der Troposphäre im antarktischen Sommer kommt, ist eine Frage, zu der es noch viel Forschungsbedarf gibt. Die Werte für den antarktischen Winter weisen ebenfalls auf eine Abkühlung hin, allerdings ist diese nicht signifikant. Da sich diese Studie nur auf eine Station beschränkt, ist eine Übertragung dieses Ergebnisses auf den Rest der Antarktis nicht möglich.

Um die Aussagen dieser Studie zu verfestigen, wären zusätzlich weitere Analysen sowie ein Vergleich der Radiosondierungen mit anderen Messverfahrensmöglichkeiten, wie MSU (Microwave Sounding Unit), Satellitenmessungen und Re-Analysen aus Klimamodellen sinnvoll.

Wie die deutlich abweichenden Ergebnisse von Turner et al. (2006) und Screen und Simmonds (2012) zeigen, ist es für Rückfolgerungen ebenfalls besonders wichtig möglichst alle bekannten und relevanten Stationen mit einzubeziehen, da es sonst zu einer starken Verfälschung der Ergebnisse führen kann. Eine Wiederholung der Untersuchungen genannter Studien inklusive der Daten von Neumayer ist anzustreben.

## 6 Dank

Ich möchte mich an dieser Stelle bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit unterstützt und motiviert haben.

Ganz besonderer Dank gilt Prof. Dr. Otto Klemm und Elisa Fleischer für die freundliche und engagierte Betreuung, sowie für die konstruktive Kritik.

Außerdem möchte ich ein großes Dankeschön an Dr. Gert König-Langlo aussprechen. Er hat mir die Daten des Alfred-Wegener-Instituts, Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung, zur Anfertigung dieser Arbeit zur Verfügung gestellt und mir mit guten Ideen und Vorschlägen jederzeit zur Verfügung gestanden. Durch die Anfertigung dieser Bachelor-Arbeit war es mir möglich, mich tiefgründiger mit den Polarregionen zu beschäftigen.

Auch möchte ich mich insbesondere bei Jana Bölter, Maximilian Dreyer und weiteren Freunden und Familie bedanken, die viel Zeit, Geduld und Mühe aufgebracht haben um mich in allem tatkräftig zu unterstützen.

## 7 Literaturverzeichnis

- AWI (o.J.a): Neumayer-Station III Arbeiten und Leben im Ewigen Eis. Online unter: <https://www.awi.de/expedition/stationen/neumayer-station-iii.html> (abgerufen am 06. August 2015)
- AWI (o.J.b.): Wetterbeobachtungen seit 1981. Online unter: <https://www.awi.de/forschung/langzeitbeobachtung/atmosphaere/antarktis-neumayer/meteorologie/synops.html> (abgerufen am 06. August 2015)
- AWI (o.J.c.): Aktuelle Ballonaufstiege. Online unter: <https://www.awi.de/forschung/langzeitbeobachtung/atmosphaere/antarktis-neumayer/meteorologie/radiosonden.html> (abgerufen am 06. August 2015)
- Bargagli, R. (2005): Antarctic Ecosystems. Environmental Contamination, Climate Change, and Human Impact. Berlin, New York: Springer (Ecological studies, v. 175).
- Chapman, W., Walsh, J. (2007): A Synthesis of Antarctic Temperatures. In: *J. Climate* 20 (16), S. 4096–4117. DOI: 10.1175/JCLI4236.1.
- Enss, D. (2004): Neubau und Betrieb der Winterstation Neumayer III und Rückführung der bestehenden Neumayer-Station II – Umweltverträglichkeitsstudie, Dessau 2004
- Johanson, C., Fu, Q. (2007): Antarctic Atmospheric Temperature Trend patterns from Satellite Observations. In: *Geophys. Res. Lett.* 34 (12). DOI: 10.1029/2006GL029108.
- König-Langlo, G., Loose, B. (2007): The Meteorological Observatory at Neumayer Stations (GvN and NM-II) Antarctica. *Polarforschung* 76 (1-2), 25 – 38 Online verfügbar unter: <http://epic.awi.de/17763/1/Kni2007o.pdf> (abgerufen am 05. August 2015)
- McKnight, T., Hess, D. (2009): *Physische Geographie*, München 2009
- Pachauri et al. (2014): IPCC Climate Change 2014 Synthesis Report. Online verfügbar unter: [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf) (abgerufen am 06. August 2015)
- Ramaswamy, V., Chanin, M., Angell, J., Barnett, J., Gaffen, D., Gelman, M. et al. (2001): Stratospheric Temperature Trends. Observations and Model Simulations. In: *Rev. Geophys.* 39 (1), S. 71. DOI: 10.1029/1999RG000065.
- Randel, W., Wu, F., (1999): Cooling of the Arctic and Antarctic Polar Stratospheres due to Ozone Depletion. In: *J. Climate* 12 (5), S. 1467–1479. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<1467:COTAAA>2.0.CO;2.
- Roland, N. (2009): *Antarktis. Forschung im ewigen Eis*. Heidelberg: Spektrum, Akad. Verl. (Spektrum-Akademischer-Verlag-Sachbuch).

- Screen, J., Simmonds, I. (2012): Half-century Air Temperature change above Antarctica. Observed Trends and spatial Reconstructions. In: *J. Geophys. Res.* 117 (D16). DOI: 10.1029/2012JD017885.
- Thompson, D., Solomon, S. (2002): Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. In: *Science (New York, N.Y.)* 296 (5569), S. 895–899. DOI: 10.1126/science.1069270.
- Turner, J., Lachlan-Cope, T., Colwell, S., Marshall, G., Connolley, W. (2006): Significant Warming of the Antarctic Winter Troposphere. In: *Science (New York, N.Y.)* 311 (5769), S. 1914–1917. DOI: 10.1126/science.1121652.
- Turner, J., Summerhayes, C., Sparrow, M., Mayewski, P., Convey, P., di Prisco, G., Gutt, J., Hodgson, D., Speich, S., Worby, T., Bo, S. and Klepikov, A. (2015): Antarctic Climate Change and the Environment – 2015 Update , Antarctic Treaty Consultative Meeting, Sofia, Bulgaria, June 2015, hdl:10013/epic.45675
- Yuan, X., Martinson, D. (2001): The Antarctic dipole and its predictability. In: *Geophys. Res. Lett.* 28 (18), S. 3609–3612. DOI: 10.1029/2001GL012969.

## **8 Schlusserklärung zur Autorenschaft**

Hiermit versichere ich, dass die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

---

Stefanie Küpperbusch, Münster, Oktober 2015

Ich erkläre mich mit einem Abgleich der Arbeit mit anderen Texten zwecks Auffindung von Übereinstimmungen sowie mit einer zu diesem Zweck vorzunehmenden Speicherung der Arbeit in eine Datenbank einverstanden.

---

Stefanie Küpperbusch, Münster, Oktober 2015

## 9 Anhang

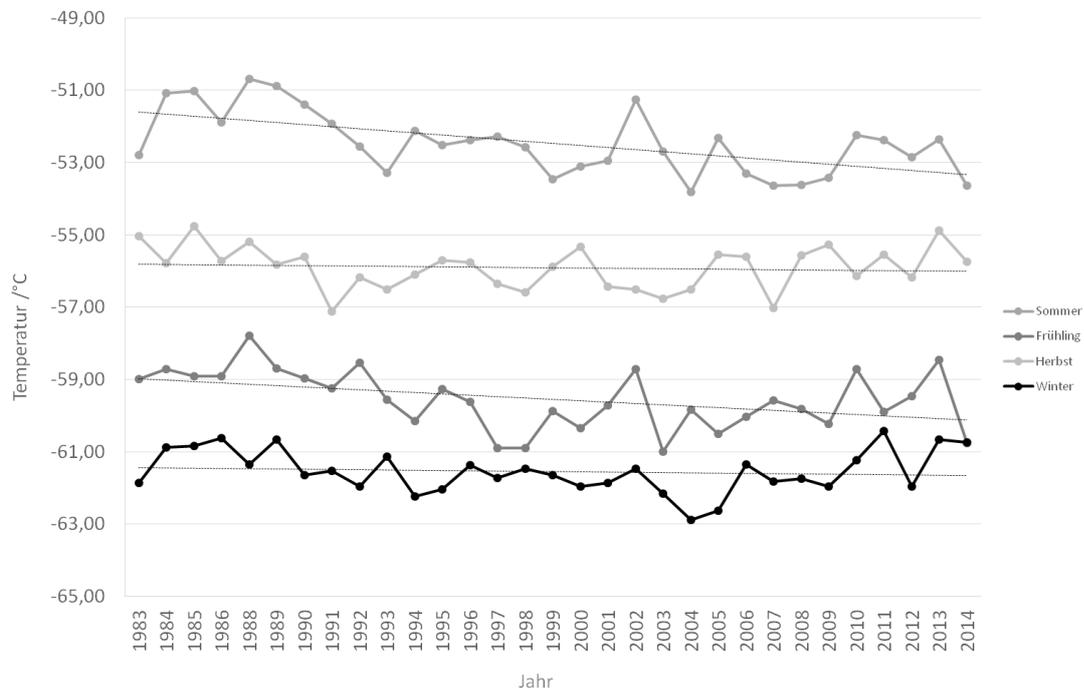


Abbildung A.1: Trend der Jahreszeiten für die Hauptdruckfläche 300 hPa.

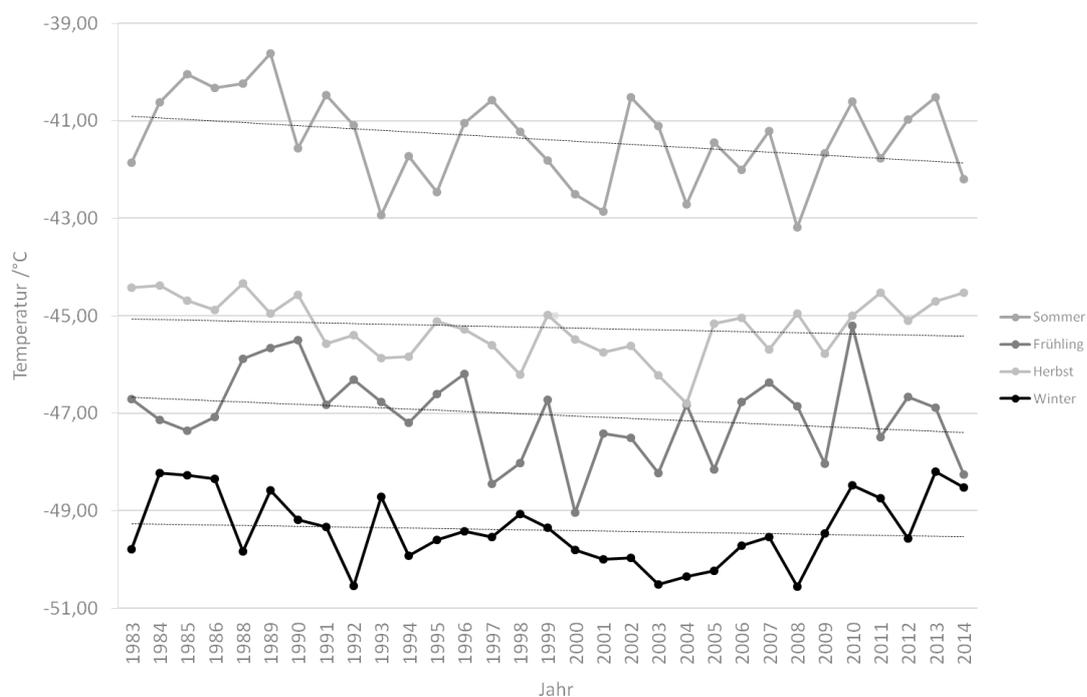


Abbildung A.2: Trend der Jahreszeiten für die Hauptdruckfläche 400 hPa.

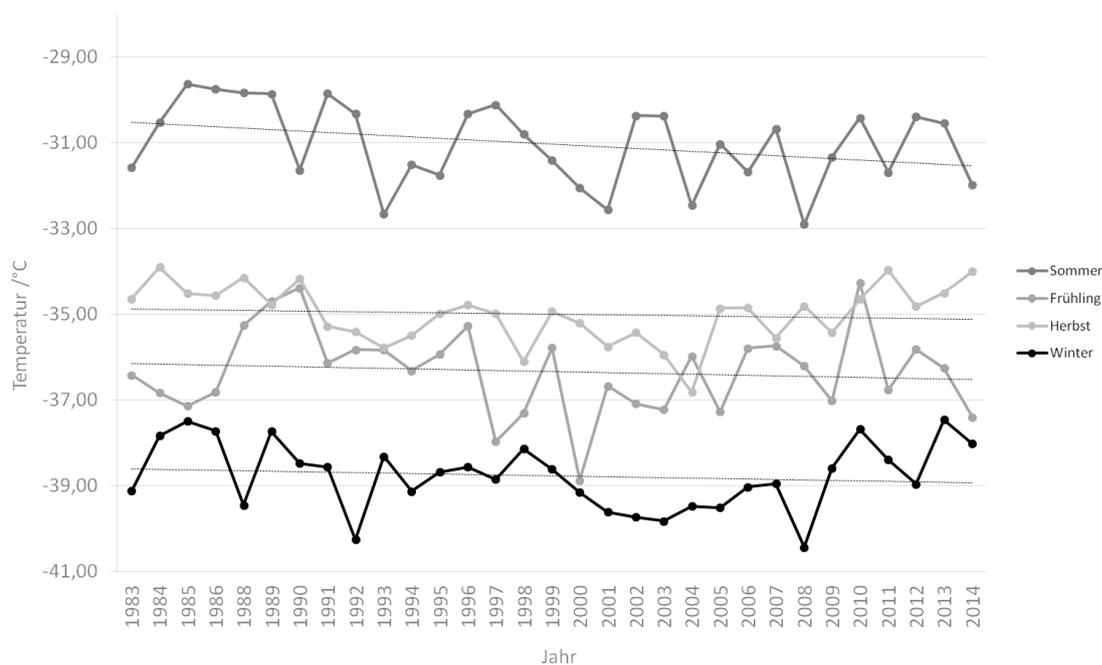


Abbildung A.3: Trend der Jahreszeiten für die Hauptdruckfläche 500 hPa.

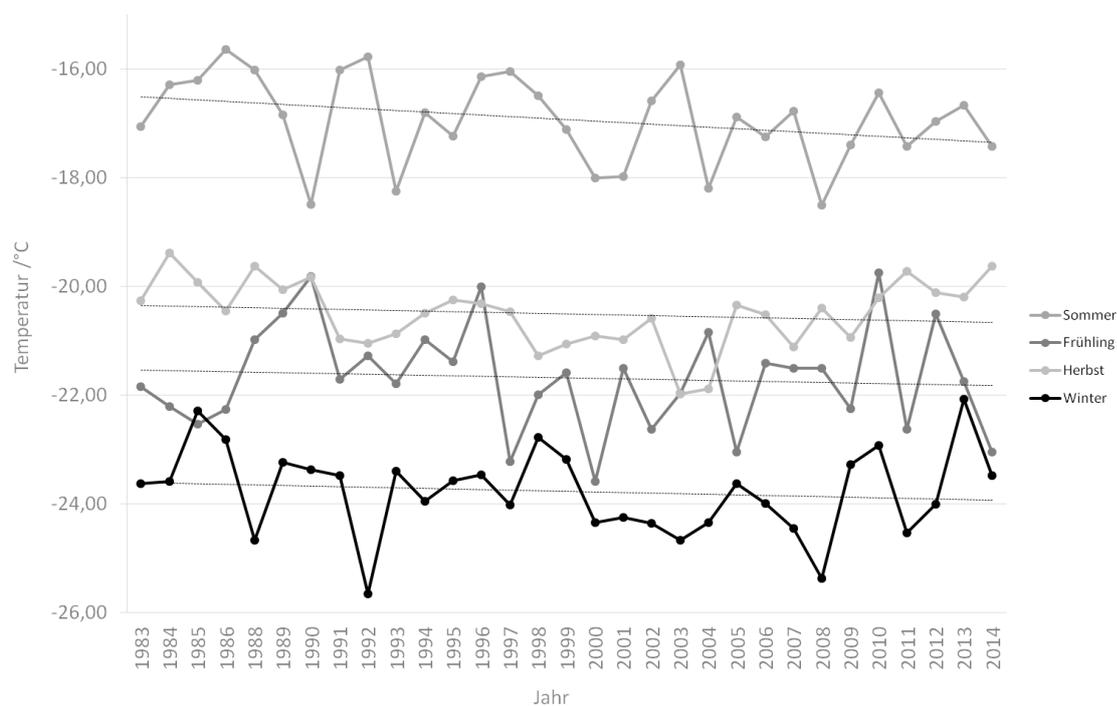


Abbildung A.4: Trend der Jahreszeiten für die Hauptdruckfläche 700 hPa.



Abbildung A.5: Trend der Jahreszeiten für die Hauptdruckfläche 850 hPa.

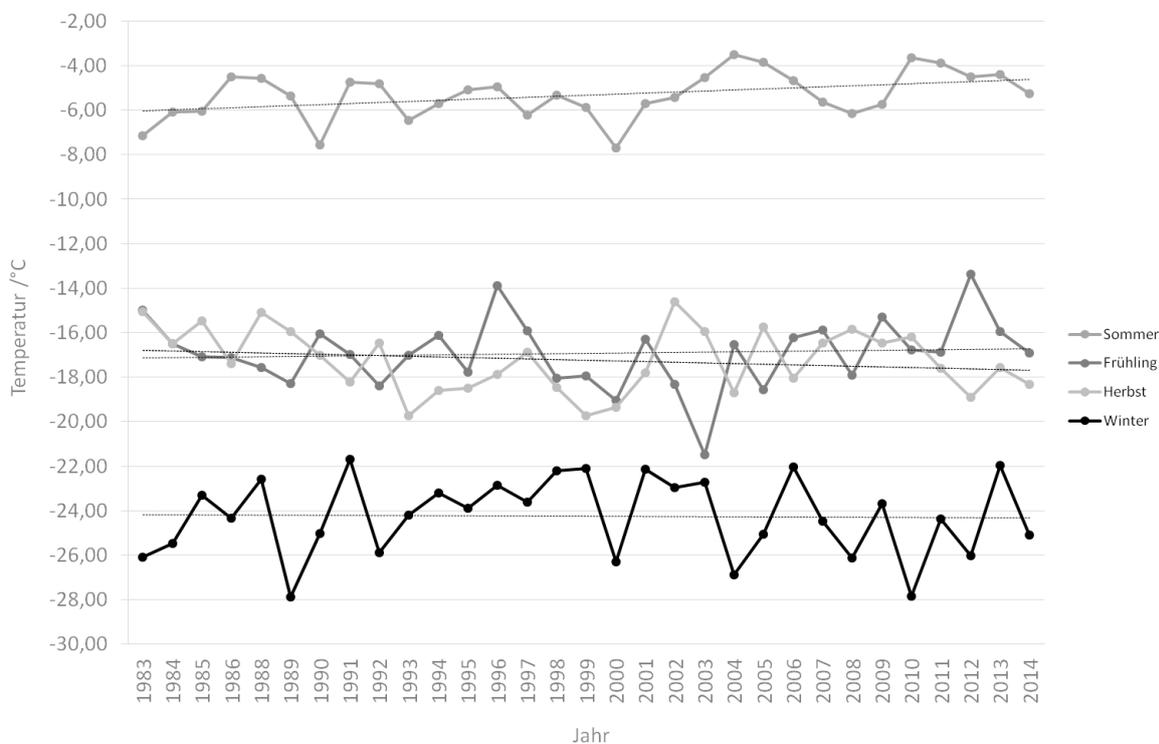


Abbildung A.6: Trend der Jahreszeiten für die Bodenwerte (40 m üNN).