

UNIVERSITÄT LEIPZIG  
Fakultät für Physik und Geowissenschaften

# **Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die mittlere Atmosphäre**

**Bachelorarbeit**

Leipzig, September 2020

vorgelegt von

Melanie Stober  
geb. am: 04.04.1999

Studiengang Physik



## **Abstract**

In the last years, the influence of the El Niño-Southern Oscillation on the atmosphere was increasingly investigated but not the influence on the atmospheric tides. Therefore, the aim of this thesis is to analyse the effects of El Niño and La Niña on the tides. In order to do this, simulations with the model MUAM have been performed. Simulations have been initialized, with lower atmosphere parameters from ERA being assimilated to characterize the respective months respectively for five winters under El Niño conditions and five winters under La Niña conditions for December, January and February. After that the mean over the single years have been calculated and the migrating diurnal, semidiurnal, terdiurnal and quarterdiurnal tides under El Niño conditions and the differences between El Niño and La Niña have been analysed. The different tides vary in their response to the El Niño-Southern Oscillation. In general below 100 km the differences between El Niño and La Niña are only small and take values between -0,3 K and 0,3 K. The different responses to El Niño and La Niña can be explained by the deviations in the forcing in the troposphere and stratosphere and by the deviations in the zonal mean background fields. Finally, the results from MUAM have been discussed in the light of model results from the literature.

## **Zusammenfassung**

In den vergangenen Jahren wurde der Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Atmosphäre zunehmend untersucht aber nicht der Einfluss auf die atmosphärischen Gezeiten. Daher war es das Ziel dieser Arbeit den Einfluss auf die Gezeitenwellen zu analysieren. Deswegen wurden Simulationen mit dem Modell MUAM durchgeführt mithilfe von ERA-Daten, welche in der unteren Atmosphäre assimiliert wurden, um die einzelnen Monate zu charakterisieren für jeweils fünf Winter unter El Niño Bedingungen und fünf Winter unter La Niña Bedingungen für Dezember, Januar und Februar. Anschließend wurde über die einzelnen Jahre der Mittelwert berechnet und die migrierenden ganztägigen, halbtägigen, 8-stündigen und 6-stündigen Gezeitenwellen unter El Niño Bedingungen und die Differenzen zwischen El Niño und La Niña wurden untersucht. Die verschiedenen Gezeitenwellen unterscheiden sich in ihrer Antwort auf El Niño-Southern Oscillation. Im Allgemeinen sind die Differenzen zwischen El Niño und La Niña unterhalb von 100 km Höhe nur gering zwischen -0,3 K und 0,3 K. Die verschiedenen Antworten auf El Niño und La Niña können durch Unterschiede in der Anregung der Gezeitenwellen in der Troposphäre und Stratosphäre sowie durch Abweichungen der zonal gemittelten Hintergrundfelder erklärt werden. Letztendlich wurden die Ergebnisse der MUAM Simulationen mit der Literatur verglichen.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Gezeitenwellen</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Das Middle and Upper Atmosphere Model (MUAM)</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>El Niño-Southern Oscillation</b>	<b>7</b>
4.1	Entstehung von El Niño-Southern Oscillation und Wellenmechanismus . . . . .	7
4.2	Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Atmosphäre . . . . .	9
4.2.1	Troposphäre . . . . .	9
4.2.2	Mittlere Atmosphäre . . . . .	10
<b>5</b>	<b>Auswertung der MUAM-Simulationen</b>	<b>14</b>
5.1	Dezember . . . . .	14
5.2	Januar . . . . .	23
5.3	Februar . . . . .	28
5.4	Überblick . . . . .	32
<b>6</b>	<b>Vergleich mit der Literatur</b>	<b>34</b>
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>36</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>37</b>
	<b>Literatur</b>	<b>III</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VI</b>
<b>A</b>	<b>Anhang: Zonalwind- und Meridionalwindamplituden der Gezeiten im Winter</b>	<b>VII</b>
A.1	Zonalwind . . . . .	VII
A.2	Meridionalwind . . . . .	IX
<b>9</b>	<b>Danksagung</b>	<b>XI</b>
<b>10</b>	<b>Eigenständigkeitserklärung</b>	<b>XI</b>



# 1 Motivation

Das Wort „El Niño“ kommt aus dem Spanischen und bedeutet so viel wie „Das Christkind“. Es wurde bereits von peruanischen Fischern im 19. Jahrhundert verwendet um den jährlichen Anstieg der Meeresoberflächentemperaturen um die Weihnachtszeit zu bezeichnen, der das Ende der Fischerfangsaison kennzeichnet. Heute bezeichnet man als „El Niño“ das Phänomen, bei dem sich der Großteil des tropischen Pazifiks erwärmt, was etwa alle vier Jahre auftritt und ungefähr ein Jahr andauert. Äquivalent dazu bezeichnet man als „La Niña“ ein Phänomen, bei dem der normale Temperaturgradient im tropischen Pazifik noch verstärkt wird. Beide Phänomene sind Teile von El Niño-Southern Oscillation. Als Southern Oscillation bezeichnet man den atmosphärischen Teil von El Niño-Southern Oscillation, der eine Art Druckschaukel zwischen dem Tiefdruckgebiet in Südostasien und dem Hochdruckgebiet im Südpazifik darstellt und damit die Stärke der Passatwinde im Pazifik entlang des Äquators bestimmt (Latif, 2006). Obwohl sich El Niño und La Niña in den Tropen ereignen, haben sie durch Telekonnektionen einen Einfluss auf die globale Atmosphäre. In den letzten 20 Jahren wurde der Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Atmosphäre zunehmend untersucht. Die wichtigsten Ergebnisse werden im Kapitel 4.2 zusammengefasst. Über den Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die atmosphärischen Gezeitenwellen ist aber bisher nur wenig bekannt. Daher wurden Simulationen mittels des Modells MUAM durchgeführt um den Einfluss auf die Gezeitenwellen zu analysieren. Die Ergebnisse der Simulationen werden im Kapitel 5 vorgestellt.

## 2 Gezeitenwellen

In der Atmosphäre breiten sich verschiedene Wellen aus. Die Amplitude der Wellen wächst dabei mit steigender Höhe, da die Dichte abnimmt aber die Wellen werden in der oberen Atmosphäre auch zunehmend gedämpft. Gezeitenwellen und planetare Wellen sind dabei großskalig. Im Gegensatz dazu gibt es auch kleinskalige Schwerewellen. Thermische Gezeitenwellen entstehen durch die tägliche Sonnenstrahlung und die damit verbundene Erwärmung. Die Gravitationskräfte des Mondes und der Sonne, die bei Gezeitenwellen im Ozean eine wichtige Rolle spielen, sind für die Atmosphäre weniger wichtig, sodass in dieser Arbeit der Fokus lediglich auf thermischen Gezeitenwellen liegt. Gezeitenwellen können in migrierende und nicht-migrierende Wellen unterteilt werden. Migrierende Gezeiten bewegen sich sonnensynchron, während nicht-migrierende Gezeiten durch feste geographische und topographische Wärmequellen entstehen sowie durch nichtlineare Wechselwirkungen mit planetaren Wellen (Andrews et al., 1987, S.157). Die migrierenden Gezeiten breiten sich stets westwärts aus mit der gleichen Geschwindigkeit wie die scheinbare Bewegung der Sonne, da sie sonnensynchron sind, während die nicht-migrierenden Gezeiten sich auch ostwärts ausbreiten können. Die nicht-migrierenden Gezeiten breiten sich dabei schneller oder langsamer als die scheinbare Bewegung der Sonne aus (Pedatella und Liu, 2013).

Die Erwärmung durch die Sonne erfolgt nur tagsüber mit einem Maximum am Mittag des Tages. Nachts hingegen findet keine Erwärmung statt, sodass sich ein Tagesverlauf wie in Abbildung 1 (schwarze Kurve) ergibt. Die blaue Gerade gibt den täglichen Durchschnitt an und die Grafik beschreibt die Situation für 2,5° nördliche Breite in 50 km Höhe (Lilienthal, 2019, S.12).

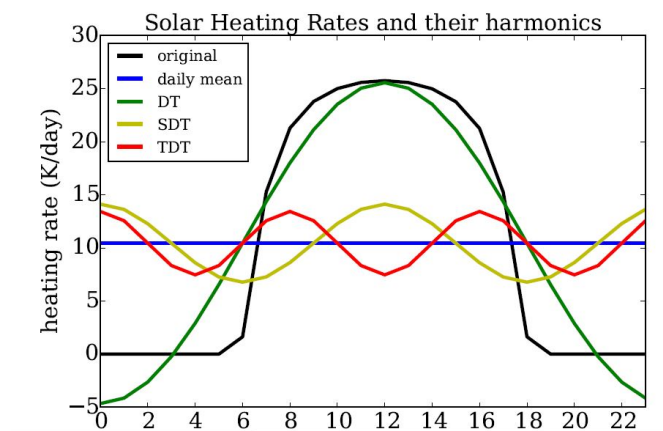


Abbildung 1 Tägliche Sonnenerwärmung schwarz, ganztägige Gezeiten (DT) grün, halbtägige Gezeiten (SDT) gelb, 8-stündige Gezeiten (TDT) rot von Lilienthal (2019). Die harmonischen Anteile sind dabei um 10 K verschoben.

Eine Fourieranalyse dieser Kurve würde harmonische Schwingungen mit Perioden von 24 Stunden, 12 Stunden und 8 Stunden ergeben, wie man in Abbildung 1 erkennt. Dadurch ergeben sich ganztägige, halbtägige, 8-stündige Gezeitenwellen und auch noch höhere harmonische Gezeiten (z.B. Lilienthal, 2019, S.12).

Mathematisch kann die horizontale Struktur von Gezeiten durch die Laplacesche Gezeitengleichung 1 beschrieben werden. Die Laplacesche Gezeitengleichung wird zur Beschreibung einer geschichteten, sphärischen Atmosphäre verwendet, die ruht im Bezug zum rotierenden Planeten



und leichte Störungen erfährt. Die Lösungen der Laplaceschen Gezeitengleichung beschreiben die Eigenschwingungen der Erde. Bei Gezeitenwellen beschreiben die Eigenwerte und Eigenfunktionen dabei aber nicht die Eigenfrequenzen, sondern die äquivalente Tiefe  $h$  analog zur Tiefe des Ozeans (Lilienthal, 2019, S.14). Nach Andrews et al. (1987, S.154 f.) erhält man für die Laplacesche Gezeitengleichung

$$\mathcal{L}\hat{\Phi} + \gamma\hat{\Phi} = 0, \quad (1)$$

mit dem Lamb-Parameter  $\gamma$  und dem Differentialoperator  $\mathcal{L}$ .

$$\gamma \equiv \frac{4\Omega^2 a^2}{gh}, \quad (2)$$

$$\mathcal{L} \equiv \frac{d}{d\mu} \left[ \frac{(1-\mu^2)}{(\sigma^2 - \mu^2)} \frac{d}{d\mu} \right] - \frac{1}{\sigma^2 - \mu^2} \left[ \frac{-s(\sigma^2 + \mu^2)}{\sigma(\sigma^2 - \mu^2)} + \frac{s^2}{1 - \mu^2} \right], \quad (3)$$

$$\mu \equiv \sin \phi. \quad (4)$$

Dabei bezeichnet  $\hat{\Phi}$  die Amplitude des Geopotentials,  $a$  den Radius der Erde,  $\phi$  die geographische Breite und  $\Omega$  die Winkelgeschwindigkeit der Erde um ihre eigene Achse sowie  $g$  die Fallbeschleunigung. Wenn man als Randbedingung annimmt, dass die Amplitude des Geopotentials an den Polen gebunden ist, d.h.  $\mu = \pm 1$ , wird Gleichung 1 ein Eigenwertproblem für eine feste zonale Wellenzahl  $s$  und ein festes  $\sigma$ , welches die mit  $\Omega$  normierte Kreisfrequenz der Welle bezeichnet. Dies kann numerisch gelöst werden mit Eigenwerten  $\gamma_n^{(\sigma,s)}$  und Eigenfunktionen  $\Theta_n^{(\sigma,s)}$ , welche an den Polen gebunden sind und für ganzzahlige  $n$  die Gleichung

$$\mathcal{L}\Theta_n^{(\sigma,s)} + \gamma_n^{(\sigma,s)}\Theta_n^{(\sigma,s)} = 0 \quad (5)$$

erfüllen. Die Eigenfunktionen  $\Theta_n^{(\sigma,s)}$  bezeichnet man dabei als Hough-Funktionen, welche die meridionale Struktur der Eigenschwingungen beschreiben.

Die vertikale Struktur  $W$  kann durch die folgende Differentialgleichung beschrieben werden:

$$\frac{d^2 W}{dz^2} + \left( \frac{N^2}{gh} - \frac{1}{4H^2} \right) W = 0. \quad (6)$$

Dabei verwendet man die Brunt-Väisälä-Frequenz  $N$  und die Skalenhöhe  $H$  sowie die Höhe  $z$ . Die migrierenden ganztägigen Gezeiten haben die zonale Wellenzahl  $s = 1$  und  $\sigma = -0,5$ . Die meridionale Struktur entspricht der ersten symmetrischen Hough-Mode und die Periode beträgt  $T = 24$  h. Ganztägige Gezeiten werden vor allem durch die Absorption von Wasserdampf in der Atmosphäre angeregt und sie haben eine kurze vertikale Wellenlänge.

Für migrierende halbtägige Gezeiten gilt  $s = 2$  und  $\sigma = -1$ . Sie haben eine große vertikale Wellenlänge mit einer Periodendauer von  $T = 12$  h. Die migrierenden halbtägigen Gezeiten werden vor allem durch Ozonabsorption in der Stratosphäre angeregt (Andrews et al., 1987, S.158). Ihre Struktur entspricht im Allgemeinen den ersten zwei Hough-Moden. Abbildung 2 zeigt die ersten symmetrischen Hough-Moden für die migrierende ganztägige und halbtägige Gezeitenwelle. Die 8-stündigen migrierenden Gezeiten haben eine zonale Wellenzahl  $s = 3$ . Außerdem können Gezeiten nach Forbes (1995, S.67-87) auch durch Absorption von Sauerstoff und Stickstoff in der Thermosphäre angeregt werden und durch nichtlineare Wechselwirkungen. Theoretisch müsste die Amplitude von halbtägigen Gezeitenwellen unterhalb der Stratopause

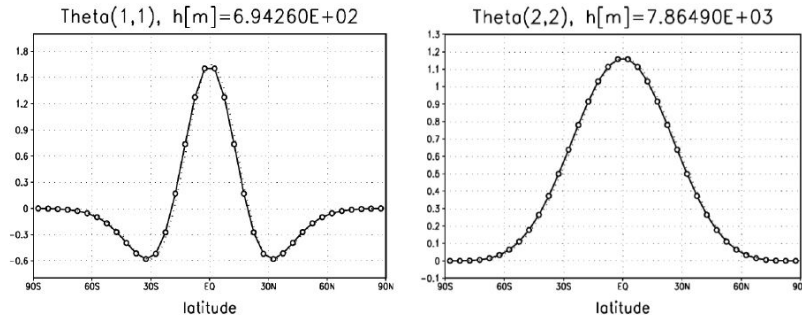


Abbildung 2 Normalisierte erste symmetrische Hough-Mode der ganztägigen migrierenden Gezeitenwelle ( $s=1$ ,  $\sigma=-0.5$ ,  $n=1$ ) (links) und der halbtägigen migrierenden Gezeitenwelle ( $s=2$ ,  $\sigma=-1$ ,  $n=2$ ) (rechts) von Lange (2001)

kleiner sein, als die der ganztägigen Gezeitenwelle, im Allgemeinen ist aber das Gegenteil der Fall. Die kleinen Amplituden der ganztägigen Gezeiten können durch ihre kleine vertikale Wellenlänge erklärt werden, welche eine Anregung der ganztägigen Gezeiten in der Ozonschicht verhindern. Halbtägige Gezeiten haben größere vertikale Wellenlängen und können effizient durch die Erwärmung in der Ozonschicht in der Stratosphäre angeregt werden. Im Gegensatz dazu tendieren die ganztägigen Gezeiten, welche sich in niedrigen geografischen Breiten vertikal ausbreiten können, dazu in der Ozonschicht destruktiv zu interferieren, was zu kleineren Amplituden führt. Oberhalb der Stratopause weisen ganztägige und halbtägige Gezeitenwellen ähnlich große Amplituden auf (Andrews et al., 1987, S.158).

### 3 Das Middle and Upper Atmosphere Model (MUAM)

MUAM ist ein nichtlineares mechanistisches 3D Gitterpunktsmodell. Bei dem Modell handelt es sich um eine Weiterentwicklung des „Cologne Model of the Middle Atmosphere – Leipzig Institute for Meteorology“ (COMMA-LIM). Die Auflösung der Breitengrade beträgt  $5^\circ$  in einem Bereich von  $-87,5^\circ$  südlicher Breite bis  $87,5^\circ$  nördlicher Breite, was 36 Breiten entspricht. Die Auflösung der Längengrade beträgt  $5,625^\circ$ , was 64 Längen von  $0^\circ$  bis  $360^\circ$  entspricht. Das Modell hat 48-60 Höhenschichten, mit einem vertikalen Gitterabstand von  $\Delta x=0,4$  in logarithmischen Druckkoordinaten mit  $x$  aus Gleichung 7, unabhängig von der Wahl der Höhenlevel. In den in Kapitel 5 durchgeführten Läufen wurde die Version des Modells mit 56 Höhenleveln genutzt. Die Höhe wird in logarithmischen Druckkoordinaten angegeben, die wie folgt definiert sind:

$$x = -\ln \frac{p}{p_0}, \quad (7)$$

$$z = -H \ln \frac{p}{p_0}. \quad (8)$$

Dabei bezeichnet  $H = 7$  km die Skalenhöhe, die im Modell fest ist und  $p_0 = 1000$  hPa den Druck auf der Erdoberfläche (Pogoreltsev et al., 2007). Nach Andrews et al. (1987, S.3) entspricht die logarithmische Druckhöhe  $z$  gut der geometrischen Höhe  $z^*$  von 80 km bis 95 km. Jedoch im Bereich von 95 km bis 120 km überragt sie die geometrische Druckhöhe um bis zu 5 km, wie man der Tabelle 1 entnehmen kann.

$z^*$ [km]	$z$ [km]
80	80,25
90	92,46
100	104,68

Tabelle 1 Vergleich der geometrischen Höhe  $z^*$  und der logarithmischen Druckhöhe  $z$  aus Andrews et al. (1987, S.3)

Die Modellphysik in MUAM basiert auf den primitiven Gleichungen für eine Kugel in logarithmischen Druckkoordinaten mit einem fixen Erdradius. Die horizontale Windkomponente wird aus den Navier-Stokes-Gleichungen ermittelt und die vertikale Windkomponente aus der Kontinuitätsgleichung. Aus der hydrostatischen Grundgleichung kann das Geopotential bestimmt werden und aus dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre die Temperatur (Lilienthal, 2019, S.43). Die Modellgleichungen werden in Flussform umgeschrieben, was eine Einhaltung der unteren und oberen Randbedingungen gewährleistet, wenn die vertikale Geschwindigkeit dort richtig behandelt wird (Fröhlich, 2005, S.35).

Die Zeitintegration wird durch ein Matsuno-Integrationsschema gelöst. Um die Stabilität der numerischen Lösung zu sichern, wird bei jedem Modellschritt die Courant-Friedrichs-Lewy Bedingung geprüft:

$$C = u \frac{\Delta t}{\Delta x} \leq C_{max} \quad (9)$$

mit  $C$  der Laufnummer, dementsprechend  $C_{max}$  der maximalen Laufnummer,  $\Delta t$  und  $\Delta x$  der zeitlichen bzw. räumlichen Auflösung sowie der Geschwindigkeit des Prozesses  $u$ . Durch Ein-

setzen von  $C_{max} = 1$  im Matsuno-Integrationsschema erhält man:

$$u \leq \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (10)$$

Das heißt die Informationsausbreitung  $\Delta x / \Delta t$  muss mindestens so groß sein wie die physikalische Ausbreitungsgeschwindigkeit  $u$ . Daher muss der Zeitschritt je nach Wahl des Höhenlevels angepasst werden: für 48 Level beträgt  $\Delta t = 450$ s, für 60 Level  $\Delta t = 100$ s und für 56 Schichten  $\Delta t = 225$ s (Lilienthal, 2019, S.37-40).

MUAM ist ein Modell für die mittlere und obere Atmosphäre. Um eine realistische Troposphäre und untere Stratosphäre zu simulieren, wird die Temperatur im Modell unterhalb von 30 km mit Reanalysedaten genudged, wodurch das zonale Mittel beeinflusst wird.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial t} \right|_{z < 30 \text{ km}} = -\frac{t_{eff,nudge}}{\tau_{nudge}} (\overline{T_{MUAM}} - \overline{T_{Reanalyse}}), \quad (11)$$

$$t_{eff,nudge} = 1 - \exp\{-(t/\tau_{nudge})^2\}. \quad (12)$$

Dabei bezeichnet  $t$  die Modellzeit,  $T$  die Temperatur,  $\tau_{nudge}$  die 5 tägige Relaxationszeit,  $\overline{T_{MUAM}}$  das zonale Mittel der Modelltemperatur und  $\overline{T_{Reanalyse}}$  das interpolierte zonal gemittelte monatliche Mittel der Temperatur der Reanalysedaten.

Bis zum Modelltag 120 passen sich die Atmosphärenparameter an die gegebenen Randbedingungen an und erreichen einen Gleichgewichtszustand. In den folgenden 90 Modelltagen können die Erwärmungsraten variieren und es können sich atmosphärische Gezeiten ausbreiten.

Die Erwärmung und Abkühlung im Modell ist durch feste Felder gegeben, dabei spielen die Gase Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Ozon, Sauerstoff und Stickstoff die wichtigste Rolle (Lilienthal, 2019, S.48 f.). In der aktuellsten Version von MUAM ist die Ozon- (Suvorova und Pogoreltsev, 2011) und Wasserdampfverteilung (Ermakova et al., 2017) durch ein 3D Feld gegeben, in der hier genutzten Version handelt es sich aber um 2D Felder.

## 4 El Niño-Southern Oscillation

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) ist eine der stärksten natürlichen Klimaschwankungen mit globalen Auswirkungen. Die Quelle von El Niño-Southern Oscillation befindet sich im äquatorialen pazifischen Ozean und das Phänomen entsteht durch die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre. Die Warmphase von El Niño-Southern Oscillation bezeichnet man als El Niño und die Kaltphase als La Niña. Als Southern Oscillation bezeichnet man die atmosphärischen Ereignisse im Zusammenhang mit El Niño-Southern Oscillation (Latif, 2006).

### 4.1 Entstehung von El Niño-Southern Oscillation und Wellenmechanismus

Die Warmphase und die Kaltphase der Southern Oscillation resultieren aus Anomalien der Walker-Zirkulation. Die Walker-Zirkulation besteht aus verschiedenen Zirkulationszellen, die im Normalfall wie in Abbildung 3 angeordnet sind. Die entscheidende Zelle für die Entstehung von El Niño und La Niña ist die über dem Pazifik.

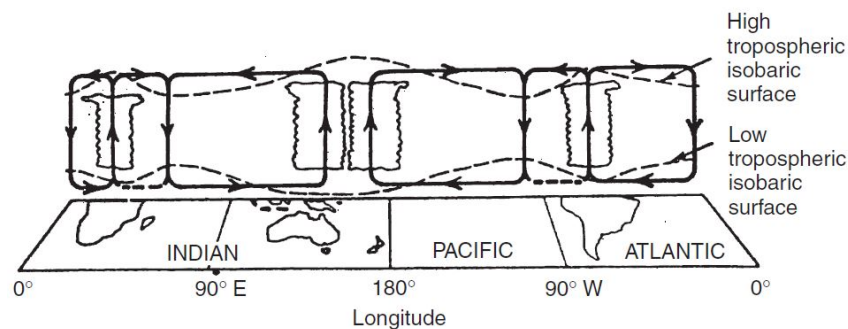


Abbildung 3 Normalfall der Walker-Zirkulation am Äquator von Lau und Yang (2002)

Im Normalfall befindet sich längs des äquatorialen Pazifiks ein signifikanter Meeresoberflächentemperaturgradient mit niedrigen Temperaturen von 20°C im Ostpazifik vor der Küste Südamerikas und recht hohen Temperaturen von 30°C im westlichen Pazifik. Die Luft steigt im Westpazifik über dem warmen Wasser auf in Verbindung mit starker Wolkenbildung und ausgeprägten Niederschlägen und sinkt über dem Ostpazifik wieder ab, was dort für trockene Bedingungen sorgt. Im Ostpazifik, vor der Küste Südamerikas, steigt unter dem Einfluss der Passatwinde kaltes Wasser aus der Tiefe auf und gelangt an die Meeresoberfläche, was die niedrigen dort herrschenden Meeresoberflächentemperaturen erklärt.

Kommt es nun zu einer Erwärmung der Meeresoberflächentemperatur über dem Ostpazifik wird der Ost-West-Gegensatz vermindert und die Southern Oscillation wird gedämpft. Der Luftdruck über dem Ostpazifik sinkt und über dem Westpazifik steigt er an, in Verbindung damit wird die Walker-Zirkulation abgeschwächt. Die Passatwinde werden schwächer und es steigt weniger kaltes Wasser vor der Küste Südamerikas auf, sodass der Anstieg der Meeresoberflächentemperatur weiter verstärkt wird und die Thermokline im weiter Ozean abflacht. Die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre endet in einem El Niño. Ein El Niño Ereignis tritt ungefähr alle vier Jahre auf und hält etwa ein Jahr an. Dabei wird der Temperaturgegensatz entlang des

Äquators stark abgeschwächt und es kommt zu einer Erwärmung im Ostpazifik mit Anomalien bis zu  $5^{\circ}\text{C}$ . Diese Änderungen führen zu Abweichungen in den tropischen Niederschlagsmustern und einer Verschiebung der Walker-Zirkulation: es kann zu Dürren über Südostasien kommen und dazu im Gegensatz zu sehr starken Niederschlägen im Westen von Südamerika (Latif, 2006).

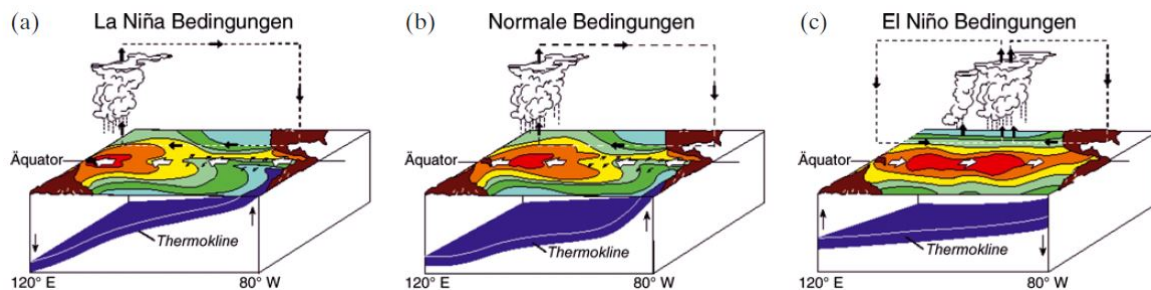


Abbildung 4 Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre während La Niña, im Normalfall und während El Niño von Latif (2006)

Bei einem La Niña Ereignis laufen die Prozesse analog aber mit einem umgekehrten Vorzeichen ab, daher kann man ein La Niña Ereignis in erster Näherung auch als El Niño Ereignis mit umgekehrten Vorzeichen betrachten. Das heißt eine anfängliche weitere Abkühlung der Meeresoberflächentemperaturen des Ostpazifik verstärkt den Ost-West-Gegensatz weiter. Damit verbunden sinkt der Luftdruck über dem Westpazifik weiter und er steigt über dem Ostpazifik weiter an. Die Walker-Zirkulation wird verstärkt und damit sind auch die Passatwinde stärker. Im Ostpazifik steigt noch mehr kaltes Wasser aus der Tiefe an die Meeresoberfläche auf, wodurch die Oberflächentemperaturen noch weiter sinken. Diese Prozesse gipfeln letztendlich in einem La Niña Ereignis, d.h. der Temperaturgegensatz der Meeresoberflächentemperaturen entlang des Äquators ist verstärkt und es bildet sich eine weit in den Zentralpazifik reichende Kaltwasserzunge aus. Dadurch sind die Temperaturen im Zentral- und Ostpazifik vergleichsweise gering und die Niederschläge über dem Westpazifik erhöht. Im Gegensatz dazu sind die Verhältnisse im Westen von Südamerika ungewöhnlich trocken.

In der Abbildung 4 sind die Wechselwirkungen zwischen Ozean und Atmosphäre für die Warm- und Kaltphase sowie für den Normalfall nochmals zusammengefasst. Man erkennt sehr gut, dass bei La Niña die Thermokline, also die Grenzfläche zwischen warmem Oberflächenwasser und kaltem Tiefenwasser, steiler verläuft als im Normalfall, während sie bei El Niño abgeflacht ist (Latif, 2006).

Das Wachstum und die Verstärkung einer anfänglichen Störung kann durch die Rückkopplung zwischen Ozean und Atmosphäre, also zwischen dem Temperaturgradienten und der Walker-Zirkulation, erklärt werden. Dadurch kann aber nicht der oszillatorische Charakter von El Niño-Southern Oscillation erklärt werden. Die Ursache für die Phasenumkehr, also z.B. ein Umschlagen von El Niño in La Niña, sind wandernde ozeanische Wellen längs des Äquators wie Abbildung 5 zeigt. Werden die Passatwinde während einem El Niño abgeschwächt, wird der Auftrieb von kaltem Wasser im Ostpazifik durch Kelvinwellen gedämpft und die weitere Erwärmung der Meeresoberflächentemperaturen wird gefördert. Im Westpazifik entstehen durch die geschwächten Passatwinde Rossbywellen, die mit einem verstärkten Auftrieb von kaltem Wasser an die Meeresoberfläche einhergehen. Die Rossbywellen breiten sich nach Westen aus und werden am Westrand des Pazifiks als Kelvinwelle reflektiert, die sich dann nach Osten aus-

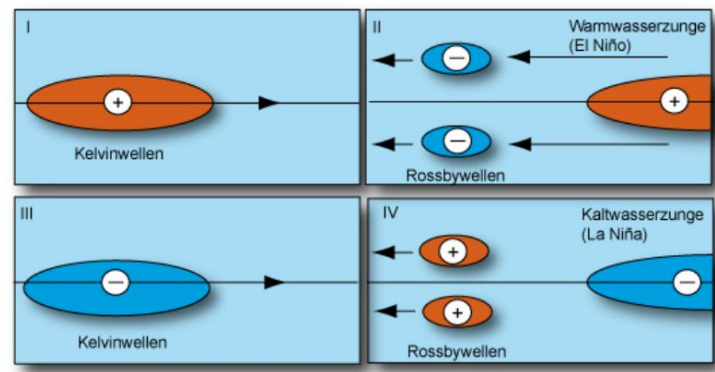


Abbildung 5 Einfluss von Kelvin- und Rossbywellen auf ENSO von Kasang (2020)

breitet. Im Ostpazifik kühlen die Kelvinwellen die Wassermassen ab und leiten ein La Niña Ereignis ein. Die ozeanischen äquatorialen Wellen sind mit vertikalen Bewegungen der Thermokline verbunden, welche wiederum einen Einfluss auf die Meeresoberflächentemperaturen haben. Da die Thermokline nur im Ostpazifik dicht unter der Meeresoberfläche liegt, werden nur dort die Meeresoberflächentemperaturen durch die Wellen beeinflusst.

El Niño-Southern Oscillation kann also als Eigenschwingung des gekoppelten Systems Ozean-Atmosphäre aufgefasst werden. Die Meeresoberflächentemperatur oszilliert mit einer Periode von vier Jahren, welche durch die Beckenbreite des Pazifiks bestimmt wird und damit durch die Laufzeit der äquatorialen Wellen, dabei muss man aber eine Überlagerung von vielen Wellen berücksichtigen (Latif, 2006).

## 4.2 Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Atmosphäre

### 4.2.1 Troposphäre

Einer der Hauptantriebe für die globale atmosphärische Zirkulation ist die Wärme, die bei der tropischen Konvektion in die Troposphäre frei wird. Änderungen in der Lokalisierung und Stärke der tropischen Wärmequellen führen zu globalen Änderungen in den Wind- und Temperaturmustern (MacPhaden, 2002). Die Auswirkungen der Southern Oscillation auf die tropische Troposphäre wurden bereits zuvor bei der Erklärung von El Niño und La Niña kurz erläutert. Durch die Verschiebung und die Änderung der Stärke der Walker-Zirkulation kommt es zu Änderungen in den Niederschlagsmustern, die in der Warmphase von ENSO über dem Westen von Südamerika zu verstärkten Niederschlägen führen und während der Kaltphase zu ungewöhnlich trockenen Verhältnissen und genau umgekehrt für den Westpazifik.

Durch Telekonnektionen können aber auch weit entfernt vom tropischen Pazifik die Einflüsse von El Niño-Southern Oscillation beobachtet werden. So haben van Loon und Labitzke (1986) die Einflüsse der Southern Oscillation auf der Nordhalbkugel für 19 Warmereignisse und 16 Kaltereignisse nördlich von 20° nördlicher Breite und sieben Kaltereignisse südlich von 20° nördlicher Breite untersucht. Daraus wurden die gemittelten Druckanomalien auf Meereshöhe ermittelt und es wurden Druckanomalien bis zu 5 mb festgestellt.

Die Telekonnektionen außerhalb der Tropen können sich vor allem durch Rossby-Wellen ausbreiten. Ein dominantes Telekonnektionsmuster unter dem Einfluss von ENSO ist das Pacific-North American Pattern. El Niño geht dabei häufig mit der positiven Phase des Pacific-North



American Pattern einher, bei dem das Aleuten-Tief verstärkt wird. La Niña wird häufig mit der negativen Phase des Pacific-North American Pattern verbunden und damit einer Abschwächung des Aleuten-Tief. (Domelsen et al., 2019).

#### 4.2.2 Mittlere Atmosphäre

Durch die atmosphärischen Wellen sind die einzelnen Schichten der Atmosphäre untereinander gekoppelt und El Niño-Southern Oscillation hat auch einen signifikanten Einfluss auf die mittlere Atmosphäre, welche die Stratosphäre, Mesosphäre und untere Thermosphäre einschließt. Garcia-Herrera et al. (2006) untersuchten die vertikale Ausbreitung eines ENSO-Temperatursignals in die mittlere Atmosphäre im „Whole Atmosphere Community Climate Model“ (WACCM) und „Middle Atmosphere European Center–Hamburg Model 5“ (MAECHAM5) und in ERA-40 Reanalysedaten. Die Analysen weisen darauf hin, dass sich das ENSO Signal in die mittlere Atmosphäre mittels sehr langen Rossbywellen ausbreitet. Die vertikale Ausbreitung ist dabei stark abhängig von der geographischen Breite und vom zonal gemittelten Zonalwind. Die Ausbreitung war am effektivsten in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel im Winter, da bei der Ausbreitung der Rossbywellen das Charney-Drazin-Kriterium berücksichtigt werden muss und ENSO Ereignisse ihr Maxima meist im nordhemisphärischen Winter erreichen. Die Analysen zeigen, dass die vertikale Ausbreitung in den Tropen auf die Troposphäre und die untere Stratosphäre beschränkt ist, wegen dem von Osten kommenden zonal gemittelten Zonalwind.

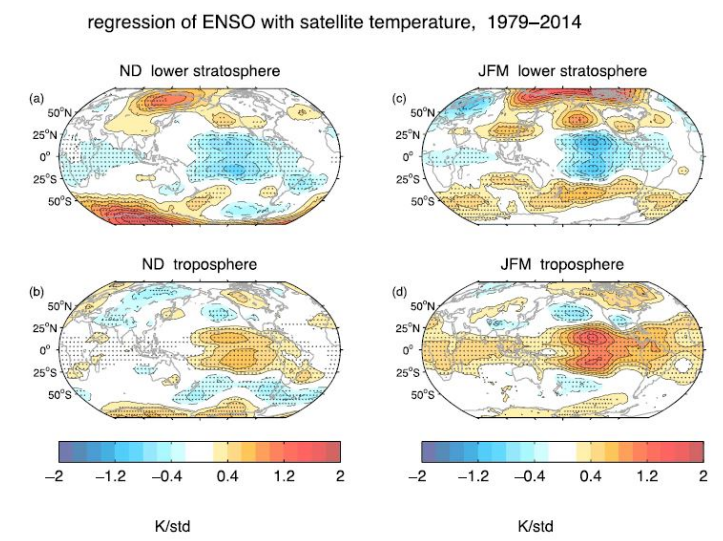


Abbildung 6 ENSO Temperatursignal von der linearen Regression von Satellitentemperaturen von 1979-2014 für November und Dezember in den Bildern (a) und (b) und für Januar, Februar und März in den Bildern (c) und (d) aus Domelsen et al. (2019)

Nach Domelsen et al. (2019) führt die gesteigerte Konvektion und Erwärmung in den Tropen während El Niño im Zentralpazifik zu einer Abkühlung in der unteren Stratosphäre. Die Temperaturanomalien in der Stratosphäre im Bezug zum zonalen Mittel haben das entgegengesetzte Vorzeichen wie die troposphärischen Temperaturanomalien wie Abbildung 6 zeigt. Die gestrichelten Bereiche sind dabei statistisch signifikant. Die Antwort von La Niña auf die tropische



Stratosphäre ist genau entgegengesetzt zu der von El Niño.

Es konnte auch gezeigt werden, dass ENSO die Winde in der unteren tropischen Stratosphäre beeinflusst, da sich der Temperaturgradient zwischen den Tropen und dem Polargebiet ändert (Labitzke, 1999). Windanomalien in Verbindung mit der Quasi-Biennial Oscillation (QBO) breiten sich während El Niño schneller aus als während La Niña. Allerdings sind die Anomalien während El Niño schwächer ausgeprägt als während La Niña (Taguchi, 2010).

El Niño-Southern Oscillation beeinflusst auch die Stratosphäre in den Extratropen. Wie bereits im Kapitel 4.2.1 beschrieben, ist das troposphärische Aleuten-Tief während El Niño intensiviert und während La Niña abgeschwächt. Dieses Tief beeinflusst aber das darüber liegende Aleuten-Hoch in der Stratosphäre und so führt eine Verstärkung des troposphärischen Tiefs auch zu einer Verstärkung des stratosphärischen Hochs. Damit kommt es zu einer Verstärkung des Transportes von Wärme und Ozon von den mittleren Breiten in das Polargebiet. (Labitzke, 1999, S.83-87). Dazu kommt die anomale vertikale Ausbreitung von planetaren Wellen in die Stratosphäre und das Brechen der Wellen. Dadurch wird der Polarwirbel geschwächt und die Brewer-Dobson-Zirkulation verstärkt. Das Absinken in den polaren Breiten auf der Nordhalbkugel führt zu einer Erwärmung der Stratosphäre bis zu 4 K. Während La Niña hingegen wird das Aleuten-Tief geschwächt und dadurch auch der Wellenfluss. Daher ist der Polarwirbel auf der Nordhalbkugel stärker und kälter während La Niña, wegen dem geschwächten stratosphärischen Wellenantrieb (Domelsen et al., 2019). Aufgrund der verstärkten Wellenaktivität während El Niño treten plötzliche stratosphärische Erwärmungen nach Taguchi und Hartmann (2006) zweimal so häufig in El Niño Wintern auf wie bei La Niña. Die für die Nordhalbkugel beschriebenen Phänomene gelten so auch für die Südhalbkugel. Auch dort wird der Polarwirbel wegen gesteigerter planetarer Wellenaktivität geschwächt und die Temperaturen sind anomal warm in der polaren Stratosphäre während einem El Niño Ereignis (Domelsen et al., 2019).

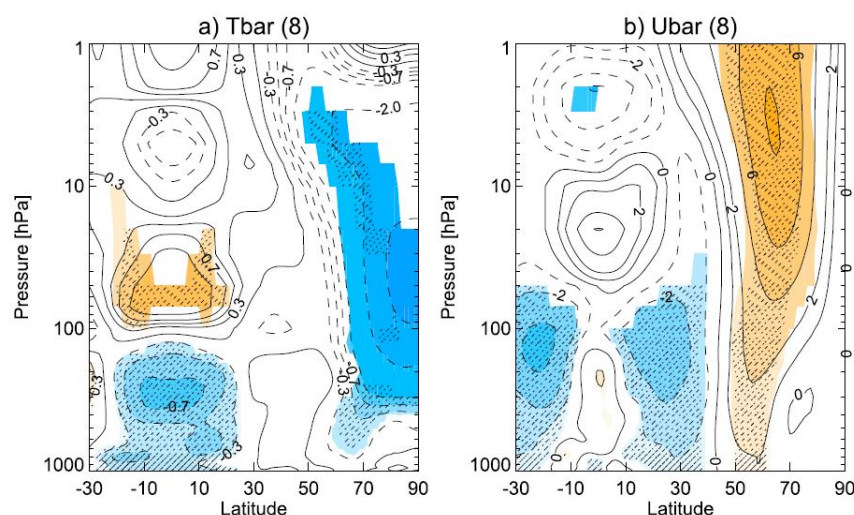


Abbildung 7 Mittel von Dezember-Januar-Februar während La Niña von (a) Temperaturanomalien und (b) Zonalwindanomalien. Gestrichelte Linien zeigen negative Anomalien an und durchgezogene Linien positive Anomalien von Iza et al. (2016)

In Abbildung 7 sind die Anomalien der Temperatur und des Zonalwindes in der Troposphäre und Stratosphäre während La Niña dargestellt, dabei wurde über Dezember, Januar und Februar

gemittelt. In den Tropen sieht man die signifikante Abkühlung der Troposphäre und damit eine Erwärmung der Stratosphäre begleitet von einer Abschwächung des subtropischen Jetstreams. In den höheren Breiten kommt es zu einer Abkühlung der Stratosphäre in Verbindung mit einer Verstärkung des Zonalwindes (Iza et al., 2016).

El Niño beeinflusst auch die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre. Es führt zu einer Reduktion von Ozon in der tropischen unteren Stratosphäre (Hood et al., 2010) und zu einem Anstieg von Ozon in der polaren unteren Stratosphäre (Sassi et al., 2004). In der mittleren und oberen Stratosphäre führt El Niño ebenfalls zu mehr Ozon (Hood et al., 2010).

Abbildung 8 zeigt eine Zusammenfassung der Einflüsse von El Niño auf die Troposphäre und die Stratosphäre.

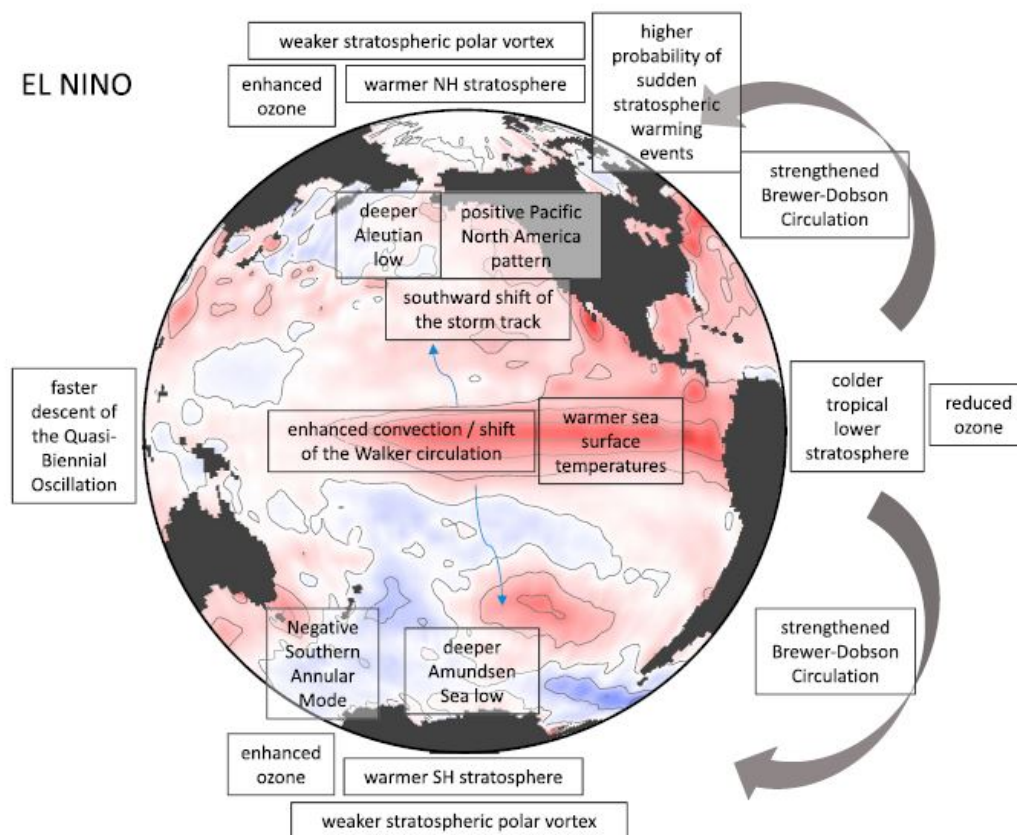


Abbildung 8 Schematischer Einfluss von El Niño auf die Troposphäre und die Stratosphäre aus Domelsen et al. (2019)

Nicht nur die Stratosphäre und die Troposphäre werden durch ENSO beeinflusst, sondern auch die Mesosphäre. Sassi et al. (2004) zeigten mittels WACCM Simulationen, dass während der Warmphase von ENSO eine signifikante Erwärmung in der polaren Stratosphäre auftritt und eine Abkühlung in der polaren Mesosphäre auf der Nordhalbkugel, was nach Li et al. (2016) zu einer wärmeren äquatorialen Mesosphäre führt. Die Zonalwindanomalien sind vor allem westwärts in der Stratosphäre und Mesosphäre während El Niño im späten Winter und zeitigen Frühjahr. Im zeitigen Winter sind die Anomalien westwärts schwächer (Sassi et al., 2004; Jacobi et al., 2017).

Man kann feststellen, dass der Einfluss von El Niño-Southern Oscillation in den letzten 20 Jahren zunehmend untersucht wurde mittels Modellsimulationen und durch Beobachtungen. Daraus konnten wichtige Erkenntnisse gewonnen werden bezüglich des Einflusses von El Niño und La Niña auf die Atmosphäre. Was bisher jedoch nur wenig untersucht wurde, ist der Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die atmosphärischen Gezeitenwellen. Dieser Einfluss auf die Gezeitenwellen soll nun mittels des Modells MUAM analysiert werden.

## 5 Auswertung der MUAM-Simulationen

In diesem Kapitel soll der Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Gezeitenwellen näher betrachtet werden. Dazu wurden Simulationen mit dem Modell MUAM durchgeführt für die Monate Dezember, Januar und Februar. Dafür wurden ERA-5 Reanalysedaten genutzt für die Winter 1982/83, 1991/92, 1997/98, 2002/03 und 2009/10 für El Niño und für die Winter 1988/89, 1998/99, 1999/00, 2007/08 und 2010/11 für La Niña. In diesen Jahren war die Stärke der Warm- bzw. Kaltereignisse moderat bis sehr stark (vgl. z.B. Weinberger et al., 2019). Anschließend wurde über die verschiedenen Jahre für El Niño und La Niña gemittelt. Hier werden nun die Ergebnisse für El Niño und die Differenzen von El Niño und La Niña für Dezember, Januar und Februar vorgestellt für die migrierenden ganztägigen Gezeiten, halbtägigen Gezeiten, 8-stündigen Gezeiten und 6-stündigen Gezeiten für die Temperatur. Im Anhang befinden sich noch die entsprechenden Bilder für den Zonalwind und den Meridionalwind, welche hier aber nicht näher analysiert werden.

### 5.1 Dezember

In diesem Abschnitt soll zunächst die Ausbreitung der Gezeitenwellen im Dezember untersucht werden. Dazu müssen das Hintergrundtemperaturfeld in Abbildung 9a und das Hintergrundfeld des Zonalwindes in Abbildung 10a betrachtet werden.

Abbildung 9a oben zeigt das gemittelte Temperaturhintergrundfeld während El Niño (links), La Niña (Mitte) und die Differenz (rechts) zwischen den beiden im Dezember. Alle drei Bilder sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite von 90° südlicher Breite bis 90° nördlicher Breite und der Höhe bis 150 km dargestellt. Die durchgezogenen schwarzen Linien in den Abbildungen von El Niño und La Niña stellen die Standardabweichung dar und die einfach gestrichenen Bereiche im Differenzbild zeigen einen p-Wert von unter 5% und die zweifach gestrichenen Bereiche einen p-Wert von unter 1% an.

Die gemittelten Hintergründe von El Niño und La Niña entsprechen der erwarteten Klimatologie. In der Troposphäre kommt es zunächst zu einer Abkühlung der Troposphäre mit der Höhe bis ungefähr 11 km Höhe, was sich in der Stratosphäre umdreht und die Temperatur mit der Höhe ansteigt bis zu einer Höhe von ungefähr 50 km. In der darüber liegenden Mesosphäre, die bis in eine Höhe von 90 km reicht, kommt es wieder zu einer Abnahme der Temperatur mit der Höhe. Die Standardabweichung ist dabei im Bereich von 50-90 km Höhe bei 50° nördlicher Breite am größten.

Die Differenzen zwischen El Niño und La Niña liegen zwischen -3 K und 4 K. Das Differenzbild zeigt, wie erwartet, eine positive Differenz in der Troposphäre über dem Äquator, da El Niño die Troposphäre in den Tropen erwärmt und La Niña sie abkühlt. Dementsprechend weist die äquatoriale untere Stratosphäre eine statistisch signifikante negative Differenz auf bis zu -1 K, denn wie im Kapitel 4.2 beschrieben wurde sind die Anomalien von El Niño-Southern Oscillation in der unteren Stratosphäre immer entgegengesetzt zu denen in der Troposphäre. Auf der gleichen Höhe sieht man eine positive Differenz von maximal 1 K in den mittleren und polaren Breiten auf der Nordhalbkugel. In der äquatorialen Mesosphäre sind die Differenzen wieder positiv bis in eine Höhe von 80 km und in den polaren Breiten auf der Südhalbkugel und auf der Nordhalbkugel von 70-100 km ist die Differenz negativ. Oberhalb von ungefähr 120 km ist die Differenz für alle geografischen Breiten positiv mit einem Maximum von 4 K. Das Hintergrundtemperaturfeld entspricht also den in der Literatur beschriebenen Erwartungen und

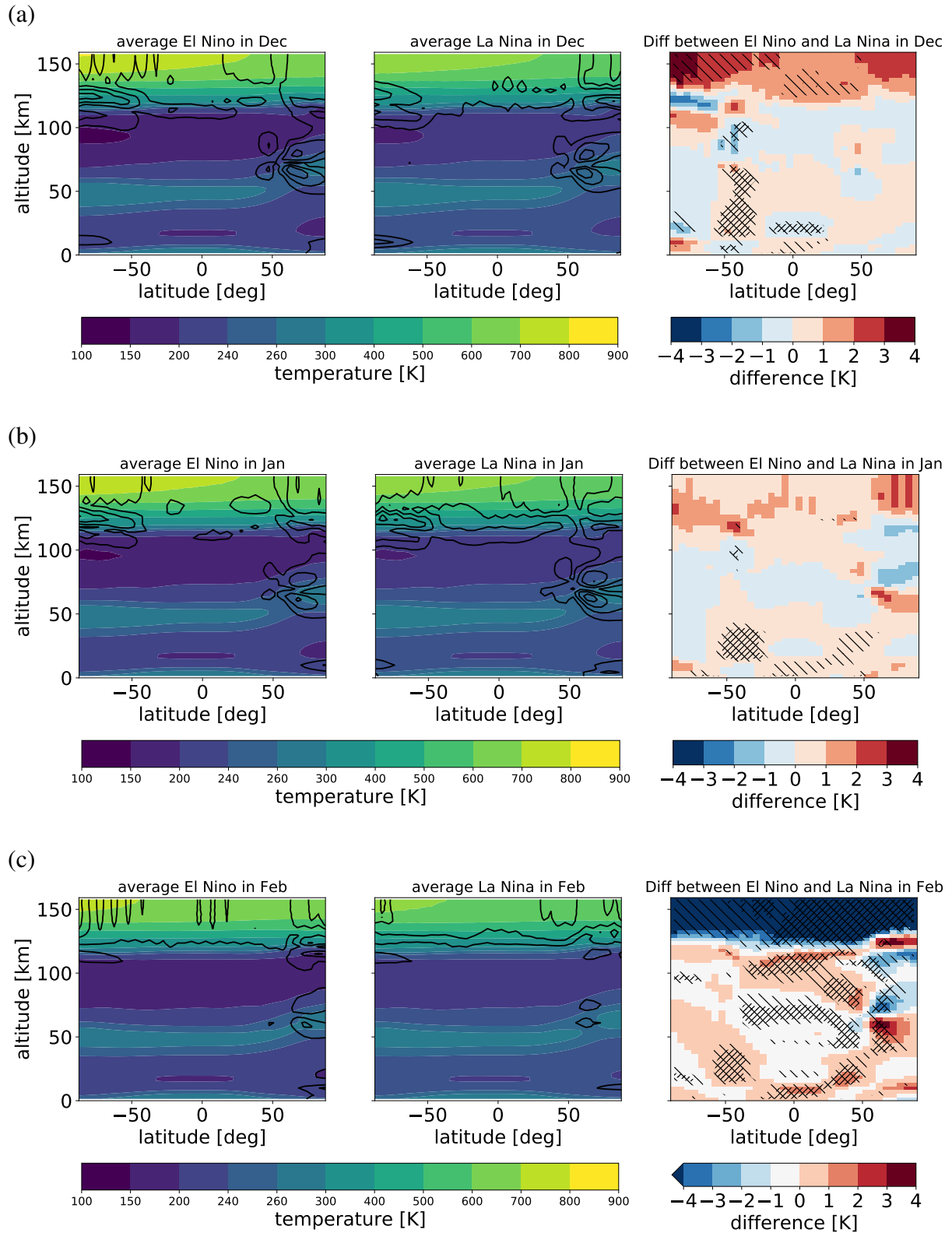


Abbildung 9 Zonal gemittetes Hintergrundfeld der Temperatur im Dezember, Januar und Februar

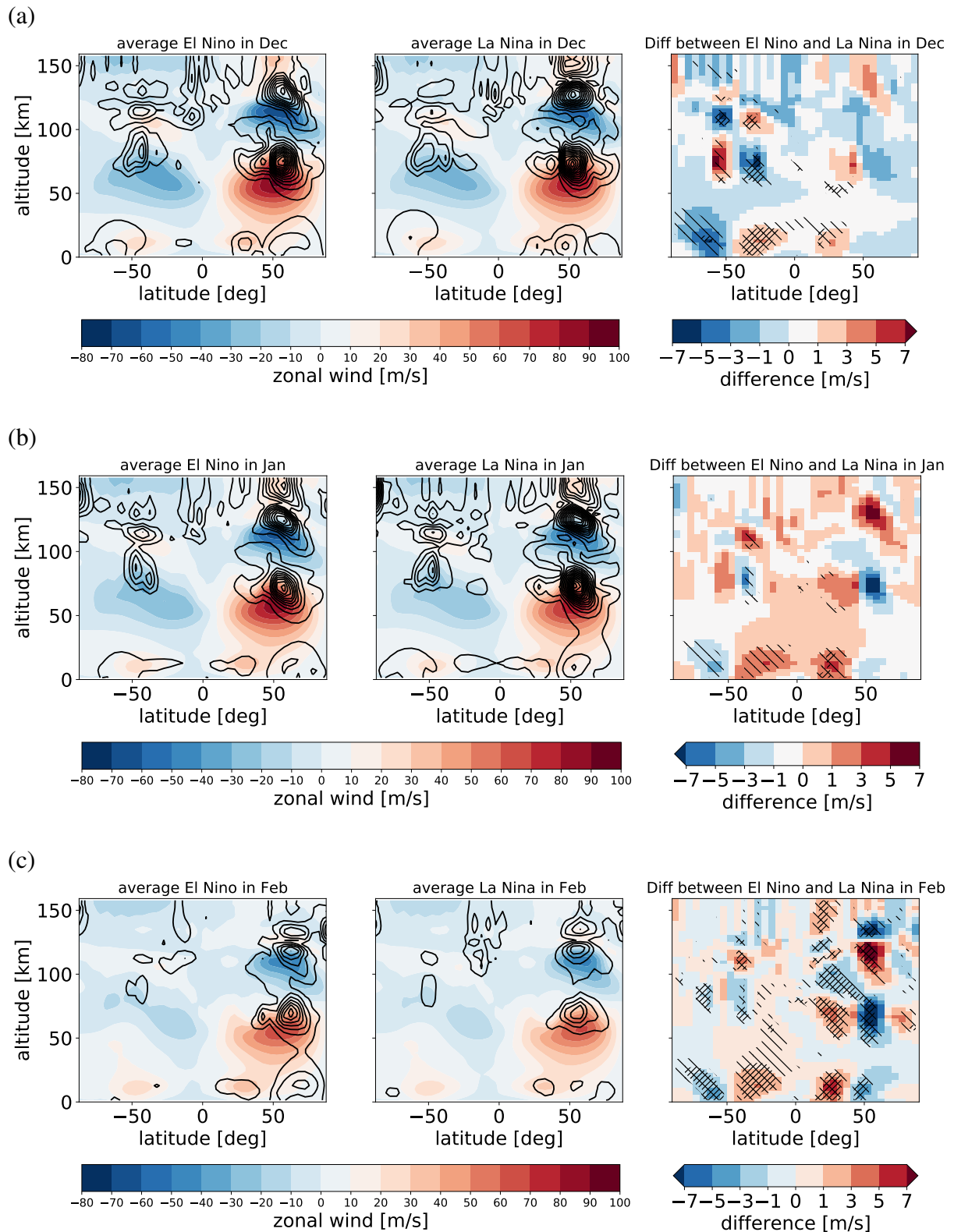


Abbildung 10 Zonal gemitteltes Hintergrundfeld des Zonalwindes im Dezember, Januar und Februar



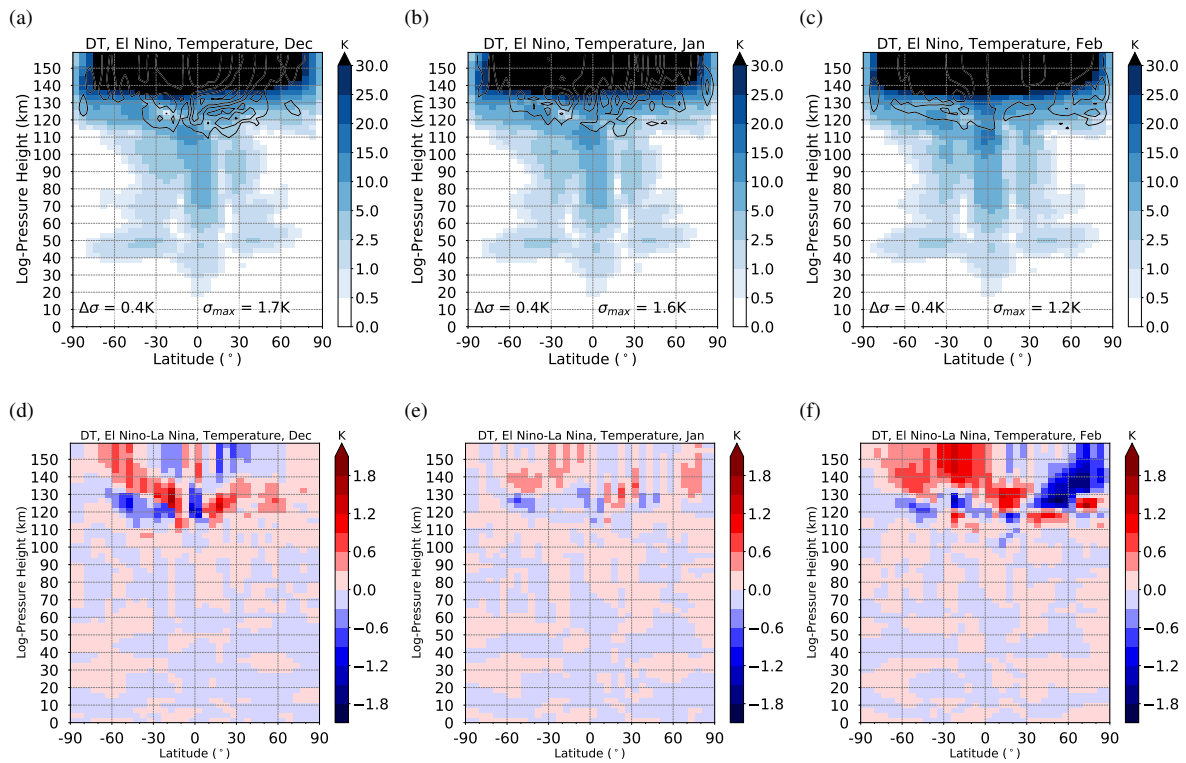


Abbildung 11 Mittelwerte der Amplitude der Temperatur der ganztägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

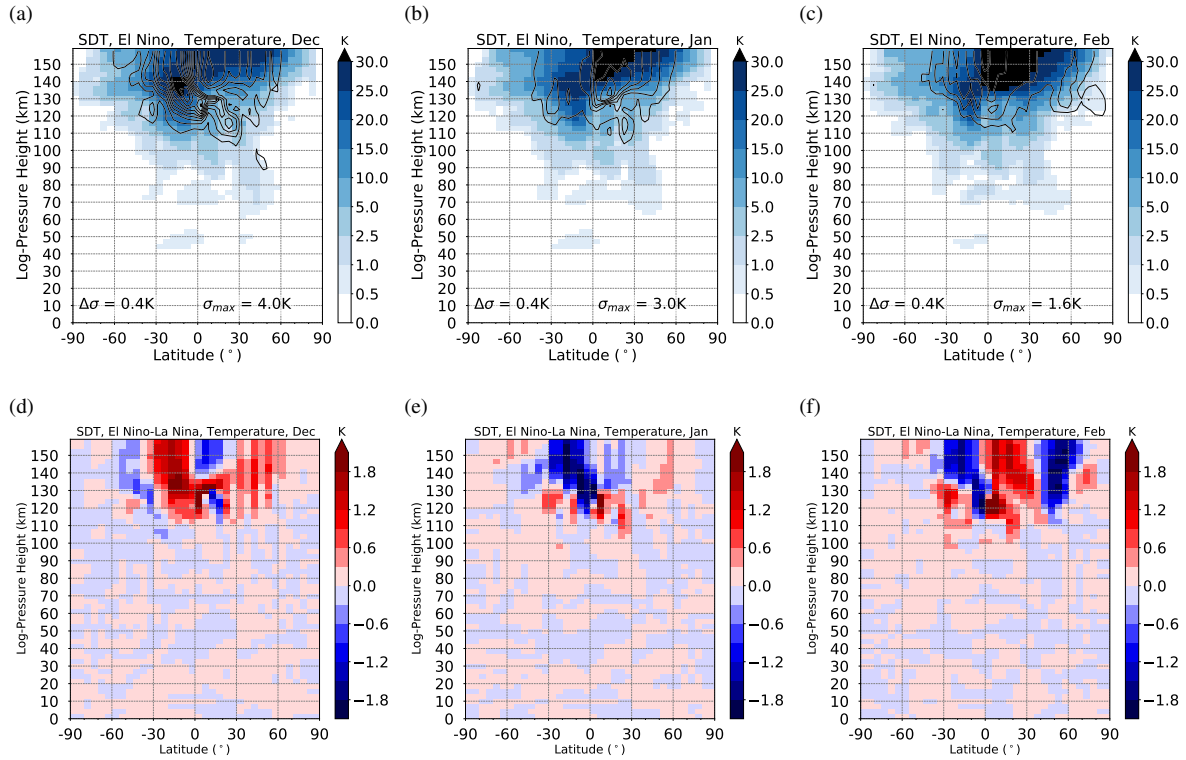


Abbildung 12 Wie Abbildung 11 aber für die halbtägige Gezeitenwelle

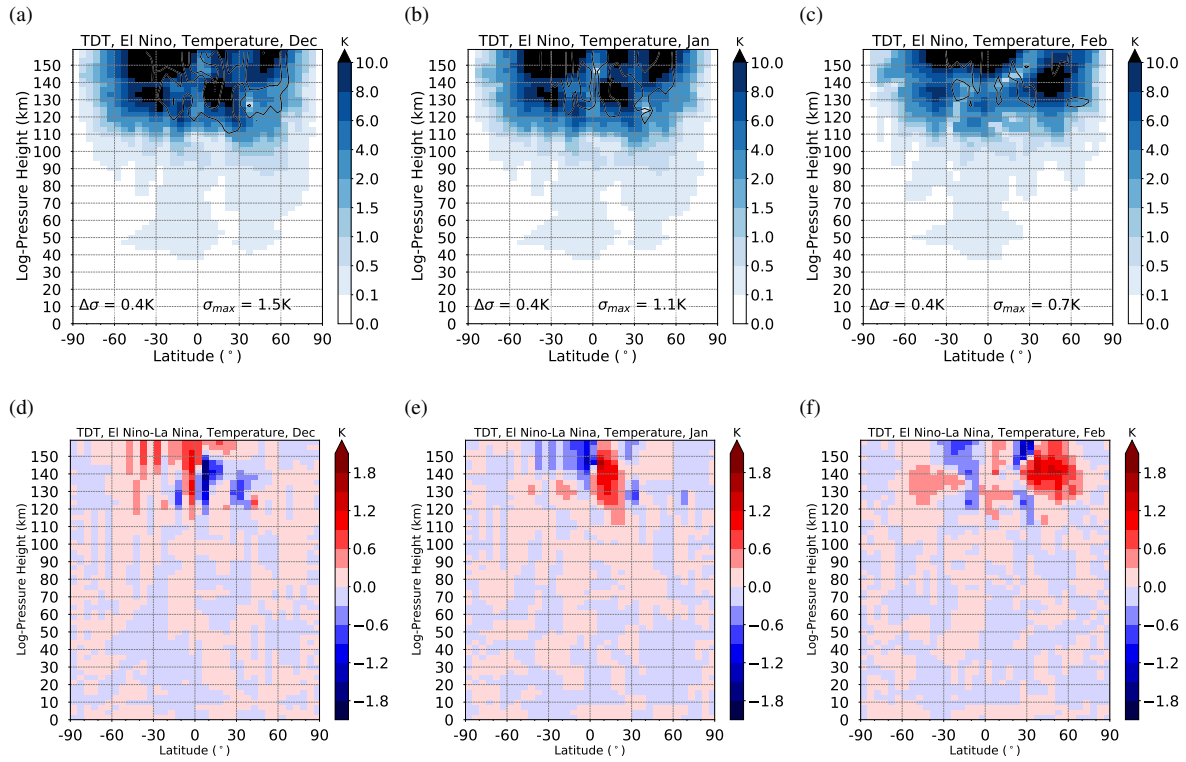


Abbildung 13 Wie Abbildung 11 aber für die 8-stündige Gezeitenwelle

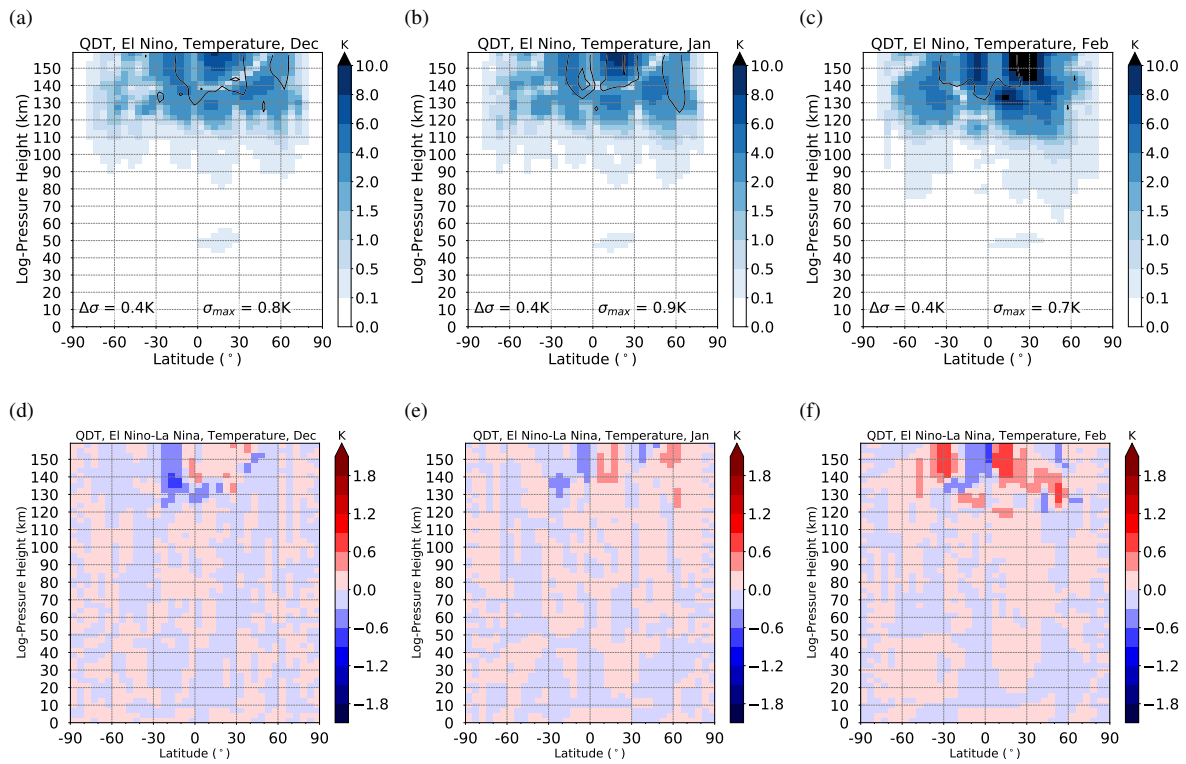


Abbildung 14 Wie Abbildung 11 aber für die 6-stündige Gezeitenwelle



stimmt auch gut mit anderen Modellen wie z.B. WACCM überein (vgl. Sassi et al., 2004). Abbildung 10a ist wie Abbildung 9a nur für das Zonalwindhintergrundfeld. Die gemittelten Hintergründe im Dezember von El Niño und La Niña entsprechen der erwarteten Klimatologie (vgl. Andrews et al., 1987, S.2). In der Troposphäre herrschen um 50° südlicher Breite und 50° nördlicher Breite Westwinde. In der Stratosphäre und Mesosphäre dominieren Westwinde auf der Nordhalbkugel und Ostwinde auf der Südhalbkugel, was sich oberhalb von 100 km in der unteren Thermosphäre umkehrt. Im Differenzbild erkennt man in der Troposphäre und unteren Stratosphäre südlich von 50° südlicher Breite eine negative Differenz und nördlich von 50° südlicher Breite eine positive Differenz und das Gleiche auch nochmal für 50° nördlicher Breite nur schwächer ausgeprägt. Das bedeutet, dass zwischen Äquator und 50° südlicher bzw. nördlicher Breite der Wind während La Niña schwächer als während El Niño ist und im Bereich von 50° südlicher bzw. nördlicher Breite ist der Wind während La Niña stärker als während El Niño. Dieses Verhalten setzt sich auch in den weiteren Höhenbereichen fort auf der Nord- und der Südhalbkugel. Dabei muss man auf der Südhalbkugel beachten, dass im Bereich von 60-100 km das Vorzeichen der Differenzen genau umgekehrt ist, weil im Hintergrund dort Ostwind herrscht. Dieses Verhalten entspricht auch den Erwartungen vgl. dazu z.B. Lu et al. (2011).

Als Erstes soll die ganztägige Gezeitenwelle näher untersucht werden. Ganztägige Gezeiten werden vor allem durch Absorption von Wasserdampf in der Troposphäre angeregt und haben eine Periode von 24 Stunden. Sie sind besonders dominant in den äquatorialen Breiten und weniger dominant in den mittleren Breiten. Durch die Tag- und Nachtgleichheit am Äquator wird die Atmosphäre 12 Stunden lang erwärmt und 12 Stunden gekühlt (vgl. z.B. Meyer, 2009, S.8), wodurch die ganztägige Gezeitenwelle effektiv angeregt werden kann, weiter polwärts nimmt die Amplitude nach Forbes (1995) ab. In der Thermosphäre werden ebenfalls Gezeiten mittels in-situ Mechanismen angeregt, wie z.B. durch Absorption solarer Strahlung von Sauerstoff und Stickstoff (Forbes, 1995; Parish et al., 1992). Ab ungefähr 120 km Höhe dominieren die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten über die in der Stratosphäre und Troposphäre angeregten Gezeiten, welche bis in die Thermosphäre propagiert sind.

Abbildung 11a zeigt die Temperaturamplitude der ganztägigen Gezeitenwelle im Dezember während El Niño und Abbildung 11d die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Beide Abbildungen sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite von 90° südlicher Breite bis 90° nördlicher Breite und der logarithmischen Druckhöhe bis 160 km dargestellt. Die durchgezogenen Linien im Bild der ganztägigen Gezeitenwelle während El Niño stellen die Standardabweichung dar mit einem Intervall von 0,4 K und einem Maximum von 1,7 K.

In Abbildung 11a erkennt man erste Strukturen ab ungefähr 18 km logarithmischer Druckhöhe am Äquator mit einer Amplitude von bis zu 1 K und in den mittleren Breiten ab 38 km bei 40° bis 70° südlicher Breite bzw. auf der Nordhalbkugel ab 40 km bei 30° bis 60° nördlicher Breite mit Ausnahme einer kleinen Struktur in 35 km Höhe bei 30° bis 35° nördlicher Breite. Diese Strukturen haben eine große vertikale Ausdehnung und die Amplitude steigt mit der Höhe leicht an, da die Luftdichte mit der Höhe abnimmt. Dabei nimmt die Amplitude am Äquator schneller zu als die in den höheren Breiten und erreicht bei 5° nördlicher Breite bis 15° südlicher Breite zwischen 105 km und 115 km logarithmischer Druckhöhe ein schwaches Maximum von bis zu 15 K. Sehr schwache Maxima mit Amplituden bis zu 5 K werden auch zwischen 25° und 50° südlicher Breite und zwischen 35° und 45° nördlicher Breite um 50 km logarithmische Druckhöhe erreicht und am Äquator bei 45 km Höhe. Ab 115 km logarithmischer Druckhöhe ist die Amplitude größer als 0,5 K über alle Breiten und wächst dann schnell an, sodass sie bereits ab

135 km am Äquator größer als 30 K ist. Auf die Pole zu nimmt die Amplitude dann wieder ab, steigt aber trotzdem mit der Höhe. Unterhalb von 115 km ist die Amplitude der ganztägigen Gezeitenwelle nur im Bereich zwischen 70° südlicher Breite und 75° nördlicher Breite größer als 0,5 K, da die Ausbreitung der ganztägigen Gezeitenwelle, wie zuvor beschrieben, am effektivsten am Äquator ist und polwärts abnimmt. Unterhalb von 110 km ist die Standardabweichung geringer als 0,4 K, allerdings ist die Amplitude in diesem Bereich auch wesentlich geringer. Die maximale Standardabweichung befindet sich zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite bei 130 km bzw. zwischen 130 km und 140 km logarithmischer Druckhöhe.

In Abbildung 11d sieht man die Differenz der ganztägigen Gezeitenwelle zwischen El Niño und La Niña. Unterhalb von 105 km logarithmischer Druckhöhe liegen die Differenzen zwischen -0,3 K und 0,3 K und oberhalb von 105 km können Werte zwischen -1,6 K und 1,6 K angenommen werden. Auf der Südhalbkugel befinden sich von 30° südlicher Breite bis zum Südpol von 15 km bis 70 km Höhe Strukturen mit positiven Differenzen, d.h. dass die Amplitude während El Niño größer ist als während La Niña. Zwischen Äquator und 60° nördlicher Breite von 65 km bis 130 km logarithmischer Druckhöhe sind die Werte auch überwiegend positiv und ab 110 km werden auch größere Werte erreicht bis 1,6 K bei 125 km Höhe. Die Struktur dehnt sich dann ab 100 km Höhe von 60° nördlicher Breite bis zum Nordpol aus und in der gesamten Struktur treten immer wieder kleinere Bereiche mit negativen Differenzen auf mit Werten bis -0,3 K. Ab 120 km und darüber dominieren dann aber bereits die Gezeiten, die in der Thermosphäre angeregt wurden. Eine weitere Struktur mit positiven Differenzen befindet sich zwischen 10° und 50° südlicher Breite zwischen 90 km und 110 km logarithmischer Druckhöhe bzw. bei höheren Breiten bis zum Südpol in größeren Höhen mit Werten bis 0,6 K. Die Struktur steht in Verbindung mit dem Bereich von 5° bis 15° südlicher Breite ab 108 km Höhe mit größeren positiven Werten, die ab 120 km Höhe auch in höheren Breiten größere Differenzen erreichen, diese liegen aber auch im Bereich, in dem die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten dominieren. Negative Differenzen überwiegen im Bereich von 10° südlicher Breite bis 10° nördlicher Breite von 10 km bis 50 km logarithmischer Druckhöhe mit Werten bis -0,3 K. In diesem Bereich ist also die Amplitude während La Niña größer als während El Niño. Ab 110 km bis 130 km Höhe zwischen 15° und 60° südlicher Breite sind die Werte ebenfalls negativ mit bis zu -1,2 K bei 125 km Höhe. Auf der Nordhalbkugel zwischen 20° nördlicher Breite bis zum Nordpol von 20 km bis 50 km logarithmischer Druckhöhe treten auch hauptsächlich negative Differenzen auf, außer in dem Bereich von 30° bis 70° nördlicher Breite von 28 km bis 40 km Höhe mit positiven Differenzen bis zu 0,3 K.

Als nächstes soll nun die halbtägige Gezeitenwelle im Dezember analysiert werden. Halbtägige Gezeiten werden vor allem durch Ozonabsorption in der Stratosphäre angeregt und haben eine Periode von 12 Stunden. In den mittleren Breiten hat die halbtägige Gezeitenwelle einen stärkeren Einfluss als die ganztägige Gezeitenwelle (z.B. Meyer, 2009, S.8). Wie bei der ganztägigen Gezeitenwelle kommt es auch bei der halbtägigen Gezeitenwelle zu in-situ Anregungen in der Thermosphäre, wobei ab 120 km bis 130 km die Wellen, die in der Thermosphäre angeregt werden dominieren (Hong und Lindzen, 1975).

Abbildung 12a zeigt die die Temperaturamplitude der halbtägigen Gezeitenwelle im Dezember während El Niño und Abbildung 12d die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Beide Abbildungen sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite von 90° südlicher Breite bis 90° nördlicher Breite und der logarithmischen Druckhöhe bis 160 km. Die durchgezogenen Linien im Bild der halbtägigen Gezeitenwelle während El Niño stellen die Standardabweichung dar

mit einem Intervall von 0,4 K und einem Maximum von 4,0 K.

In Abbildung 12a erkennt man erste Strukturen mit Amplituden bis zu 1 K zwischen 5° nördlicher Breite und 30° südlicher Breite zwischen 45 km und 55 km logarithmischer Druckhöhe und bei 30° nördlicher Breite um 50 km logarithmischer Druckhöhe. Darüber sieht man drei Strukturen bei 40° südlicher Breite bei 70 km logarithmischer Druckhöhe, um den Äquator bei knapp 70 km logarithmischer Druckhöhe und bei 30° bis 60° nördlicher Breite ab 60 km Höhe. Diese drei Strukturen verbinden sich ab ungefähr 90 km logarithmischer Druckhöhe zu einer Struktur, deren Amplitude mit der Höhe anwächst und die auch in Richtung höhere Breiten wächst, da in der Thermosphäre in-situ Anregungen stattfinden. Die Struktur reicht daher ab 130 km logarithmischer Druckhöhe vom Südpol bis zu 70° nördlicher Breite. Das Maximum von über 30 K liegt zwischen 130 km und 145 km logarithmischer Druckhöhe zwischen dem Äquator und 30° südlicher Breite im Bereich, in dem die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten überwiegen. Aber auch darüber ist die Amplitude noch sehr hoch mit einem Wert von bis 30 K und einer Ausdehnung bis 60° nördlicher Breite oberhalb von 150 km logarithmischer Druckhöhe. In den höheren Breiten in Richtung der Pole nimmt die Amplitude trotzdem wieder ab. Die Standardabweichung unterhalb von 100 km logarithmischer Druckhöhe liegt wie bei der ganztägigen Gezeitenwelle auch unter 0,4 K. Im Bereich zwischen 60° südlicher Breite und 60° nördlicher Breite ab 100 km Höhe erreicht die Standardabweichung höhere Werte bis zu 4,0 K.

In Abbildung 12d sieht man die Differenz zwischen El Niño und La Niña mit Werten zwischen -1,6 K bis über 1,8 K, damit sind die Differenzen etwas größer als im Fall der ganztägigen Gezeitenwelle. Unterhalb von 100 km logarithmischer Druckhöhe sind die Differenzen schwach im Bereich zwischen -0,3 K bis 0,3 K. Vom Äquator bis zum Südpol sind bis in 30 km logarithmischer Druckhöhe positive Differenzen bis 0,3 K dominant, wobei die absoluten Werte wahrscheinlich weit unter 0,3 K liegen, da die Amplitude in dem Bereich nur sehr gering ist. Äquivalent dazu überwiegen von 30° nördlicher Breite bis zum Nordpol bzw. ab 20 km Höhe vom Äquator bis 75° nördlicher Breite bis in 40 km Höhe ebenfalls positive Differenzen. Das heißt bis in die Stratosphäre sind die Amplituden während El Niño i.Allg. größer als während La Niña. Eine Ausnahme bildet dabei z.B. die Struktur im Bereich von 20° südlicher Breite bis 55° nördlicher Breite bis in 20 km Höhe mit Differenzen bis zu -0,3 K. Die Amplitude während El Niño überwiegt auch im Bereich von 30° bis 60° nördlicher Breite zwischen 40 km und 90 km logarithmischer Druckhöhe. Negative Differenzen dominieren von 25° südlicher Breite bis 30° nördlicher Breite von 30 km bis 50 km Höhe bzw. bis 65 km Höhe vom Äquator bis 30° nördlicher Breite. Im Bereich von 30° südlicher Breite bis zum Südpol in 90 km bis 120 km logarithmischer Druckhöhe bzw. vom Äquator bis 30° südlicher Breite von 100 km bis 110 km Höhe überwiegen auch negative Werte. Dabei werden zwischen 20° und 35° südlicher Breite Werte bis -0,6 K erreicht. Bei der Struktur zwischen Äquator und 20° nördlicher Breite ab 90 km überwiegen positive Differenzen, wobei ab 110 km logarithmischer Druckhöhe auch größere Werte bis 1,8 K ab 120 km erreicht werden können. Ebenso können bei 15° nördlicher Breite ab 110 km auch stärkere negative Differenzen erreicht werden bis -1,6 K bei 128 km Höhe.

Nun soll die 8-stündige Gezeitenwelle betrachtet werden. Nach Lilienthal (2019, S.67) wird sie hauptsächlich durch Absorption von Wasserdampf in der Troposphäre und durch Absorption von Ozon in der Stratosphäre angeregt. Andere Anregungsmechanismen wie nicht-lineare Gezeitenwechselwirkungen oder Wechselwirkungen mit Schwerewellen spielen nur in bestimmten Bereichen eine größere Rolle (vgl. Lilienthal, 2019, S.115). Außerdem hat die 8-stündige Ge-

zeitenwelle eine kleinere Amplitude als die ganz- und die halbtägige Gezeitenwelle.

Abbildung 13a zeigt die Temperaturamplitude der 8-stündigen Gezeitenwelle im Dezember im linken Bild während El Niño und Abbildung 13d die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Beide Abbildungen sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite von  $90^\circ$  südlicher Breite bis  $90^\circ$  nördlicher Breite und der logarithmischen Druckhöhe bis 160 km dargestellt. Die durchgezogenen Linien im Bild der 8-stündigen Gezeitenwelle während El Niño stellen die Standardabweichung dar mit einem Intervall von 0,4 K und einem Maximum von 1,5 K.

Die Amplituden in Abbildung 13a sind wie erwartet kleiner als die der ganztägigen bzw. halbtägigen Gezeitenwelle. Eine Amplitude mit Werten über 0,1 K wird ab 38 km zwischen  $5^\circ$  nördlicher Breite und  $15^\circ$  südlicher Breite und ab 40 km Höhe bei  $35^\circ$  bis  $40^\circ$  nördlicher Breite erlangt. Werte über 0,5 K erreicht die Amplitude erst ab 85 km logarithmischer Druckhöhe zwischen  $45^\circ$  und  $55^\circ$  nördlicher Breite und zwischen  $10^\circ$  nördlicher Breite und  $20^\circ$  südlicher Breite ab ungefähr 88 km Höhe. Man erkennt in der Abbildung auch wieder die Tendenz, dass die Amplitude mit der Höhe steigt und in Richtung der Pole abnimmt und ab 120 km überwiegend die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Die Maximalwerte von über 10 K erreicht die Amplitude oberhalb von 120 km in fünf verschiedenen Bereichen. Die Standardabweichung erreicht nur Werte über 0,4 K im Bereich von  $40^\circ$  südlicher Breite und  $65^\circ$  nördlicher Breite oberhalb von 110 km Höhe. Das Maximum von 1,5 K wird um den Äquator zwischen  $5^\circ$  südlicher Breite und  $15^\circ$  nördlicher Breite ab knapp 140 km logarithmischer Druckhöhe erreicht oder bei  $15^\circ$  nördlicher Breite in ungefähr 135 km Höhe.

Abbildung 13d zeigt wie bereits erwähnt die Differenz der Temperaturamplitude der 8-stündigen Gezeitenwelle zwischen El Niño und La Niña. Unterhalb von 115 km logarithmischer Druckhöhe sind die Differenzen nur schwach innerhalb des Intervalls von -0,3 K bis 0,3 K, darüber liegen die Differenzen zwischen -1,8 K und 1,2 K. Von  $5^\circ$  bis  $60^\circ$  nördlicher Breite überwiegen bis in 60 km logarithmischer Druckhöhe positive Differenzen bis 0,3 K, wobei die Differenzen wegen der geringen Amplitude wesentlich kleinere absolute Werte als 0,3 K haben. Auch zwischen Äquator und  $20^\circ$  südlicher Breite von 50 km bis 120 km Höhe dominieren positive Werte, wobei von 112 km bis 120 km Werte bis 0,6 K erlangt werden und darüber noch bis 1,2 K. Im Bereich von  $30^\circ$  bis  $60^\circ$  südlicher Breite ab 60 km logarithmischer Druckhöhe ist die Amplitude während El Niño ebenfalls größer als während La Niña, dabei werden ab 118 km Höhe auch Werte bis 0,6 K erreicht. Eine große Struktur mit negativen Werten befindet sich zwischen  $5^\circ$  nördlicher Breite und  $35^\circ$  südlicher Breite, ab 35 km logarithmischer Druckhöhe mit einer Ausdehnung bis maximal  $65^\circ$  südlicher Breite und bis über 120 km Höhe bei  $10^\circ$  bis  $15^\circ$  südlicher Breite, wo dann die in der Thermosphäre angeregten Gezeitenwellen dominieren wie im Fall der ganz- und halbtägigen Gezeitenwelle. Eine weitere zusammenhängende Struktur mit negativen Differenzen befindet sich zwischen  $50^\circ$  nördlicher Breite und dem Nordpol von 30 km bis 60 km logarithmischer Druckhöhe und im Bereich vom Äquator bis  $40^\circ$  nördlicher Breite in 50 km bis 90 km Höhe dominieren ebenfalls negative Werte bis -0,3 K.

Als Letztes soll in diesem Unterkapitel die 6-stündige Gezeitenwelle untersucht werden. Die Amplituden der 6-stündigen Gezeitenwelle in der mittleren Atmosphäre sind noch kleiner als die der 8-stündigen Gezeitenwelle. Der dominante Anregungsmechanismus ist wieder die Erwärmung durch die Sonne, andere Mechanismen wie nicht-lineare Wechselwirkungen zwischen den Gezeiten erzeugen nach Jacobi et al. (2018); Geißler et al. (2020) nur kleine Amplituden. Abbildung 14a zeigt die Temperaturamplitude der 6-stündigen Gezeitenwelle im Dezember während El Niño und Abbildung 14d die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Beide Ab-

bildungen sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite von 90° südlicher Breite bis 90° nördlicher Breite und der logarithmischen Druckhöhe bis 160 km dargestellt. Die durchgezogenen Linien im Bild der 6-stündigen Gezeitenwelle während El Niño stellen die Standardabweichung dar mit einem Intervall von 0,4 K und einem Maximum von 0,8 K.

In Abbildung 14a erkennt man, dass die Amplitude wie erwartet noch kleiner ist als die der 8-stündigen Gezeitenwelle mit einem Maximalwert von bis zu 10 K. Eine erste Struktur mit einer Amplitude über 0,1 K befindet sich zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite von 42 km bis 58 km logarithmischer Druckhöhe. Darüber ist die Amplitude wieder kleiner als 0,1 K. Ab 80 km Höhe erkennt man vier Strukturen die erneut Werte über 0,1 K erreichen: von 35° bis 75° südlicher Breite ab 88 km, 5° bis 20° südlicher Breite oberhalb von 90 km Höhe und vom Äquator bis 30° nördlicher Breite ab 80 km logarithmischer Druckhöhe sowie von 45° bis 70° nördlicher Breite ab 85 km Höhe. Diese vier Strukturen verbinden sich zwischen 105 km und 110 km und die Amplitude steigt mit der Höhe und nimmt in Richtung der Pole ab. Die Amplitude ist nur im Bereich zwischen 80° südlicher Breite bis 80° nördlicher Breite größer als 0,1 K und ab 102 km logarithmischer Druckhöhe bei 60° bis 65° nördlicher Breite werden Werte über 0,5 K erreicht. Das Maxima mit Werten bis 10 K wird erst in 158 km Höhe in den niedrigen Breiten auf der Nordhalbkugel erreicht. Es liegen auch weitere schwächere Nebenmaxima oberhalb von 120 km aber in diesem Bereich dominieren wie bei den anderen Gezeitenwellen die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Verglichen mit den anderen Gezeitenwellen ist der Maximalwert der Standardabweichung der 6-stündigen Gezeitenwelle auch geringer, wobei dabei berücksichtigt werden muss, dass die Amplitude ja ebenfalls kleiner ist. Die Standardabweichung ist größer als 0,4 K im Bereich 30° südlicher Breite und 65° nördlicher Breite über 125 km logarithmischer Druckhöhe. Die maximale Standardabweichung von 0,8 K wird bei ungefähr 0° bis 5° nördlicher Breite in 138 km Höhe erreicht und im Bereich zwischen 20° bis 30° nördlicher Breite von 142 km bis 145 km logarithmischer Druckhöhe.

In Abbildung 14d sieht man die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Bis in 120 km logarithmischer Druckhöhe liegen die Differenzen im Intervall von -0,3 K bis 0,3 K und darüber zwischen -0,9 K bis 0,6 K im Bereich von 25° südlicher Breite bis 50° nördlicher Breite. Von 30° südlicher Breite bis 15° nördlicher Breite von 50 km bis 120 km Höhe überwiegen die positiven Differenzen mit Werten bis zu 0,3 K, wobei auch kleine Bereiche mit negativen Differenzen bis -0,3 K auftreten. Auch im Bereich von 30° bis 50° nördlicher Breite bis in 50 km logarithmischer Druckhöhe und von 45° bis 75° südlicher Breite von 60 km bis 120 km dominieren positive Differenzen, d.h. die Amplitude ist während El Niño größer als während La Niña. Zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite von 10 km bis 100 km Höhe bzw. ab 55 km zwischen 15° und 50° nördlicher Breite befindet sich eine Struktur mit negativen Differenzen. Im Bereich von 20 km bis 50 km von 10° bis 35° südlicher Breite und bei 30° bis 55° südlicher Breite ab 60 km Höhe bzw. ab 90 km nur noch zwischen 30° und 45° südlicher Breite überwiegen auch negative Differenzen mit Werten bis -0,3 K.

## 5.2 Januar

Abbildung 9b und 10b zeigen das Hintergrundtemperatur- und Hintergrundzonalwindfeld im Januar. Die beiden Hintergrundfelder ähneln denen vom Dezember in den verschiedenen Höhenbereichen grundlegend und entsprechen ebenfalls den Erwartungen (vgl. z.B. Lu et al. (2011) und Sassi et al. (2004)). Es kommt allerdings zu stärkeren Temperatur- und Winddifferenzen in den polaren Breiten auf der Nordhalbkugel, dafür sind die auf der Südhalbkugel schwächer.

Dabei muss beachtet werden, dass sich die Farbskala für die Differenz des Hintergrundfeldes des zonalen Windes im Dezember und Januar unterscheidet.

Abbildung 11b zeigt die Temperaturamplitude der ganztägigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 11e die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Die Abbildung hat dabei den gleichen Aufbau wie Abbildung 11a.

In Abbildung 11b links sieht man erste Strukturen mit einer Amplitude größer als 0,5 K ab einer Höhe von 18 km am Äquator und bei 30° bis 35° nördlicher Breite ab 32 km logarithmischer Druckhöhe bzw. zwischen 40° bis 70° südlicher Breite ab 38 km Höhe. Die Amplitude steigt dann mit der Höhe an und sinkt in Richtung höhere Breiten. In der Thermosphäre ab 122 km logarithmischer Druckhöhe ist die Amplitude größer als 1 K über allen Breiten und wächst dann sehr schnell mit der Höhe. Ab 130 km Höhe am Äquator erreicht die Amplitude Werte über 30 K, wobei dort die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten dominieren. In den höheren Breiten zwischen 80° südlicher Breite und 80° nördlicher Breite werden Werte über 30 K erst bei größeren Höhen bis 145 km logarithmischer Druckhöhe erreicht. Die Amplitude erreicht ein Nebenmaxima am Äquator mit bis zu 15 K zwischen 105 km und 118 km Höhe und ein weiteres Nebenmaxima bei 25° bis 30° südlicher Breite in 100 km bis 102 km logarithmischer Druckhöhe mit Maximalwerten bis zu 10 K. Noch schwächere Maxima mit Werten bis zu 5 K befinden sich am Äquator zwischen 45 km und 48 km Höhe sowie bei 35° bis 45° nördlicher Breite bei 50 km Höhe und bei 25° bis 50° südlicher Breite zwischen 45 km und 52 km logarithmischer Druckhöhe. Am effektivsten kann sich die ganztägige Gezeitenwelle wie erwartet am Äquator ausbreiten und in der Mesosphäre hat die Amplitude nur im Bereich zwischen 60° südlicher Breite und 70° nördlicher Breite Werte über 0,5 K. Unterhalb von 110 km ist die Standardabweichung unter 0,4 K, d.h. die Strukturen unterhalb von 110 km sind in allen Jahren nah am Mittelwert, wobei die Amplitude in diesem Bereich auch geringer ist. Das Maxima der Standardabweichung von 1,6 K wird auf der Nordhalbkugel zwischen 15° und 50° nördlicher Breite zwischen 128 km bis 160 km logarithmischer Druckhöhe in fünf Bereichen erreicht bzw. auf der Südhalbkugel zwischen 128 km und 135 km logarithmischer Druckhöhe zwischen 15° und 25° südlicher Breite.

Vergleicht man die ganztägige Gezeitenwelle im Januar mit der im Dezember in Abbildung 11a links so erkennt man, dass nur geringe Abweichungen auftreten. So erreicht die Amplitude im Dezember zwischen 70 km und 80 km in den höheren Breiten noch Werte über 0,5 K während die Amplitude im Januar ab 60° nördlicher bzw. südlicher Breite unter 0,5 K liegt.

Im Differenzbild in Abbildung 11e erkennt man, dass die Abweichungen zwischen El Niño und La Niña nur gering sind im Bereich zwischen -0,9 K bis 0,9 K und die größten Differenzen vor allem oberhalb von 120 km auftreten. Unterhalb von 112 km logarithmischer Druckhöhe liegen die Werte im Bereich von -0,3 K bis 0,3 K. Zwischen 50° südlicher Breite und dem Südpol von 15 km bis 40 km bzw. ab 30 km Höhe von 20° südlicher Breite bis zum Südpol befindet sich eine Struktur mit positiven Differenzen. Darüber bis in eine Höhe von 50 km sind die Werte negativ mit bis zu -0,3 K. Im Bereich darüber ab 42 km in den hohen Breiten bzw. ab 50 km zwischen 25° und 65° südlicher Breite befindet sich eine weitere Struktur mit positiven Differenzen. Auch im Dezember in Abbildung 11d waren zwei Strukturen mit positiven Differenzen zu sehen, allerdings waren sie dort direkt miteinander verbunden und nicht durch eine negative Struktur getrennt. Im äquivalenten Bereich auf der Nordhalbkugel von 25° nördlicher Breite bis zum Nordpol von 22 km bis 40 km logarithmischer Druckhöhe waren die Differenzen im Januar ebenfalls positiv. Eine weitere Struktur mit positiven Werten bis 0,3 K befindet sich zwischen 5°

südlicher Breite und 50° nördlicher Breite ab 70 km Höhe bzw. ab 110 km bei 10° bis 15° nördlicher Breite mit Werten bis zu 0,6 K. Darüber sind die Differenzen auch noch größer aber in diesem Bereich dominieren wieder die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Eine ausge dehnte negative Struktur befindet sich zwischen 10 km und 98 km logarithmischer Druckhöhe bei 15° südlicher Breite bis 10° nördlicher Breite bzw. ab 80 km nur noch zwischen 5° bis 15° südlicher Breite, wobei in diesem Bereich bei 40 km bis 55 km vom Äquator bis 20° südlicher Breite noch eine positive Differenz auftritt. Negative Differenzen dominieren auch zwischen 30° und 80° nördlicher Breite von 40 km bis 60 km Höhe und bei 35° bis 65° nördlicher Breite von 80 km bis 110 km logarithmischer Druckhöhe. Zwischen Äquator und 10° nördlicher Breite werden ab 110 km auch negative Werte bis -0,6 K erreicht.

Im Dezember in Abbildung 11d rechts sind ab 110 km Höhe auch schon stärkere Differenzen über  $\pm 0,6$  K aufgetreten. In beiden Monaten treten zwischen 30° nördlicher Breite und dem Nordpol in der unteren Stratosphäre zunächst negative Differenzen auf, darüber dann positive Differenzen bis in 40 km Höhe mit einer größeren Ausdehnung im Januar und anschließend wieder negative Differenzen. Auch zwischen Äquator und 20° nördlicher Breite im Dezember bzw. 35° nördlicher Breite im Januar von 65 km bis 100 km treten in beiden Monaten positive Differenzen auf.

Abbildung 12b zeigt die Temperaturamplitude der halbtägigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 12e die Differenz zwischen El Niño und La Niña. Beide Abbildungen sind in Abhängigkeit von der geografischen Breite und der logarithmischen Druckhöhe. Die durchgezogenen Linien im Bild der halbtägigen Gezeitenwelle während El Niño stellen die Standardabweichung dar mit einem Intervall von 0,4 K und einem Maximum von 3,0 K.

In Abbildung 12b erkennt man erste Strukturen mit Amplituden bis zu 1 K beim Äquator bis 30° südlicher Breite zwischen 42 km und 52 km logarithmischer Druckhöhe. Im Bereich darüber bis 62 km Höhe liegt die Amplitude unterhalb von 0,5 K. Erst ab 62 km logarithmischer Druckhöhe zwischen 35° und 45° nördlicher Breite und bei knapp 70 km Höhe zwischen 5° und 20° südlicher Breite ist die Amplitude wieder größer als 0,5 K. Die Amplitude steigt dann mit der Höhe an und sinkt in Richtung der Pole. In 130 km logarithmischer Druckhöhe reicht die Struktur ungefähr vom Südpol bis 85° nördlicher Breite und in diesem Bereich dominieren bereits die in der Thermosphäre angeregten Gezeitenwellen. Das Maximum befindet sich zwischen Äquator und 45° nördlicher Breite, wobei Werte von über 30 K am Äquator bereits bei 140 km logarithmischer Druckhöhe erreicht werden. Die Standardabweichung erreicht vor allem im Bereich zwischen 45° südlicher Breite und 60° nördlicher Breite über 105 km logarithmischer Druckhöhe Werte über 0,4 K. Die maximale Standardabweichung von 3 K wird bei 10° bis 15° nördlicher Breite zwischen 132 km und 138 km Höhe erreicht.

Vergleicht man die halbtägige Gezeitenwelle im Januar mit der im Dezember in Abbildung 12a so erkennt man, dass die grobe Struktur ähnlich ist. Es kommt nur zu kleinen Abweichungen, so sind z.B. die Amplituden bei 70 km bis 80 km Höhe zwischen 20° südlicher Breite und 50° nördlicher Breite in beiden Monaten zwischen 0,5 K und 1 K groß. Im Dezember treten in diesem Bereich aber zwei getrennte Strukturen auf, während sie im Januar verbunden sind. Im Dezember befindet sich bei 30° bis 40° nördlicher Breite um 50 km logarithmische Druckhöhe auch noch eine kleine Struktur mit Werten über 0,5 K, die im Januar nicht auftritt. Außerdem ist die maximale Standardabweichung im Dezember um 1 K größer als im Januar.

Im Differenzbild zwischen El Niño und La Niña in Abbildung 12e werden Werte zwischen -1,8 K und 1,8 K angenommen. Unterhalb von 98 km logarithmischer Druckhöhe sind die Differen-

zen nur gering mit Werten von -0,3 K bis 0,3 K. Positive Differenzen dominieren von 10 km bis 40 km logarithmischer Druckhöhe von 20° nördlicher Breite bis zum Nordpol bzw. ab 20 km Höhe von 20° bis 75° nördlicher Breite. Im entsprechenden Bereich auf der Südhalbkugel von 30° südlicher Breite bis zum Südpol bis 30 km Höhe überwiegen ebenfalls positive Differenzen. Im Bereich von 15° bis 75° südlicher Breite von 50 km bis 110 km logarithmischer Druckhöhe dominieren auch positive Werte, wobei in 98 km Höhe auch schon Werte bis 0,6 K erreicht werden. Die Struktur hat ab 110 km Höhe nur noch eine Ausdehnung von 25° bis 50° südlicher Breite und erreicht oberhalb von 120 km auch Differenzen bis 0,9 K. In diesem Bereich dominieren aber bereits die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Ab 70 km Höhe bei 15° bis 40° nördlicher Breite bzw. ab 90 km Höhe zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite befindet sich eine weitere Struktur mit positiven Differenzen. Ab 102 km werden sogar Werte bis 0,6 K erreicht und bei 115 km logarithmischer Druckhöhe Werte bis 1,2 K. Negative Differenzen dominieren zwischen 30° südlicher Breite und 10° nördlicher Breite von 30 km bis 60 km Höhe bzw. ab 50 km Höhe zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite. Weitere Strukturen bei denen die Amplitude während La Niña größer als während El Niño ist, befinden sich bei 40° nördlicher Breite bis zum Nordpol von 70 km bis 100 km Höhe und bei 15° südlicher Breite bis zum Äquator ab 85 km Höhe, wobei ab 115 km logarithmischer Druckhöhe auch stärkere negative Werte erreicht werden bis -1,8 K bei 130 km Höhe.

Im Bereich von 30° bis 60° nördlicher Breite und um 30° südlicher Breite bis 30 km Höhe dominieren im Januar und im Dezember in Abbildung 12d positive Differenzen. Zwischen 20° und 70° südlicher Breite dominieren im Januar von 60 km bis 110 km Höhe positive Differenzen aber im Dezember von 90 km bis 110 km Höhe negative. In diesem Bereich kam es aber auch zu Abweichungen zwischen der halbtägigen Gezeitenwelle während El Niño im Januar in Abbildung 12b und im Dezember in Abbildung 12a.

Anschließend soll nun die 8-stündige Gezeitenwelle untersucht werden. Abbildung 13b zeigt die Temperaturamplitude der 8-stündigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und 13c die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

Wie im Dezember ist die Amplitude der 8-stündigen Gezeitenwelle im Januar in Abbildung 13b links kleiner als die Amplitude der ganz- und der halbtägigen Gezeitenwelle. Eine Amplitude über 0,1 K wird ab 38 km bei 15° südlicher Breite bis 5° nördlicher Breite erreicht und bei 30° bis 45° nördlicher Breite ab 42 km logarithmischer Druckhöhe. Die Amplitude der beiden Strukturen wächst dann mit der Höhe und sie verbinden sich ab 82 km logarithmischer Druckhöhe. Ab 85 km Höhe erreicht die Amplitude Werte über 0,5 K bei 45° bis 50° nördlicher Breite und zwischen Äquator und 5° nördlicher Breite ab 88 km. In Richtung der Pole nimmt die Amplitude wieder ab, sodass nur Werte über 0,1 K zwischen 85° südlicher Breite und 85° nördlicher Breite ab 118 km logarithmischer Druckhöhe erreicht werden. Bis 120 km Höhe werden Amplituden bis 8 K erreicht und darüber ab 125 km Höhe auch Werte über 10 K, aber in diesem Bereich dominieren bereits die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Die Standardabweichung hat einen Maximalwert von 1,1 K und nimmt zwischen 40° südlicher Breite und 60° nördlicher Breite oberhalb von 115 km logarithmischer Druckhöhe Werte über 0,4 K an.

Die 8-stündige Gezeitenwelle im Januar ähnelt der im Dezember in Abbildung 13a stark, es kommt nur zu kleineren Abweichungen. Zum Beispiel hat die Struktur zwischen 30° und 60° nördlicher Breite bei 50 km bis 60 km Höhe im Dezember eine etwas größere Ausdehnung.

Im Differenzbild in Abbildung 13e werden Werte zwischen -1,6 K bis 1,8 K angenommen und



unterhalb von 110 km logarithmischer Druckhöhe liegen die Differenzen im Intervall von -0,3 K bis 0,3 K. Positive Differenzen dominieren von 5° bis 30° südlicher Breite ab 20 km Höhe bzw. ab 50 km logarithmischer Druckhöhe von 20° südlicher Breite bis 5° nördlicher Breite. Eine weitere Struktur mit positiven Differenzen befindet sich zwischen Äquator und 60° nördlicher Breite ab 60 km Höhe, wobei von 110 km bis 122 km logarithmischer Druckhöhe auch Werte bis 0,6 K angenommen werden. Darüber werden auch noch größere Differenzen erreicht, in diesen Höhen dominieren aber die Gezeiten, die erst in der Thermosphäre angeregt wurden. Eine weitere Struktur mit positiven Werten bis 0,3 K befindet sich zwischen 30° und 60° südlicher Breite ab 80 km logarithmischer Druckhöhe. Negative Differenzen dominieren im Bereich von 30° bis 75° nördlicher Breite von 10 km bis 60 km Höhe sowie von 15° bis 45° südlicher Breite bis in eine Höhe von 30 km.

Ein Vergleich zwischen der 8-stündigen Gezeitenwelle im Januar und der im Dezember in Abbildung 13d rechts ergibt, dass im Bereich von 5° bis 30° südlicher Breite von 20 km bis 50 km logarithmischer Druckhöhe im Januar vor allem positive Differenzen sind, während im Dezember negative Differenzen überwiegen. Darüber bis in eine Höhe von 120 km sind die Werte in beiden Monaten positiv. Sowohl im Januar als auch im Dezember befindet sich zwischen Äquator und 30° südlicher Breite in 90 km bis 130 km logarithmischer Druckhöhe eine positive Differenz. Im Januar werden bei 110 km bis 120 km Höhe bereits Werte bis 0,6 K erreicht, im Dezember aber nur bis 0,3 K.

Als Letztes soll in diesem Abschnitt die 6-stündige Gezeitenwelle betrachtet werden. Abbildung 14b zeigt die Temperaturamplitude der 6-stündigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 14e die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

Die Amplitude der 6-stündigen Gezeitenwelle in Abbildung 14b ist kleiner als die der 8-stündigen Gezeitenwelle. Eine erste Struktur mit Amplituden über 0,1 K befindet sich zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite von 45 km bis 55 km logarithmischer Druckhöhe. Darüber sinkt die Amplitude wieder auf Werte unter 0,1 K und erreicht erneut eine Amplitude über 0,1 K bei 50° bis 55° nördlicher Breite und bei 15° bis 20° nördlicher Breite in 80 km Höhe, bei 10° bis 15° südlicher Breite ab 92 km, bei 45° bis 50° südlicher Breite ab 88 km sowie bei 65° bis 70° südlicher Breite ebenfalls ab 88 km. Diese Strukturen verbinden sich dann zwischen 100 km und 110 km logarithmischer Druckhöhe. Die Amplitude steigt mit der Höhe und erreicht ab knapp 105 km bei 50° bis 60° nördlicher Breite Werte über 0,5 K und auf der Südhalbkugel ab 108 km Höhe zwischen Äquator und 5° südlicher Breite sowie bei 65° bis 70° südlicher Breite. In Richtung der Pole sinkt die Amplitude und hat nur Werte über 0,1 K zwischen 80° südlicher Breite und 80° nördlicher Breite. Bis 120 km Höhe erreicht die Amplitude Werte bis 2 K, welche zuerst bei 40° bis 60° nördlicher Breite ab 115 km angenommen werden. Über 120 km steigt die Amplitude noch weiter mit einem Maximum bis 10 K aber in diesem Bereich dominieren bereits die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Die Standardabweichung hat einen Maximalwert von 0,9 K und erreicht zwischen 30° südlicher Breite und 70° nördlicher Breite über 125 km logarithmischer Druckhöhe Werte größer als 0,4 K. Werte über 0,8 K werden zwischen Äquator und 10° südlicher Breite von 138 km bis 150 km Höhe erreicht sowie bei 25° nördlicher Breite von 145 km bis 160 km Höhe.

Die 6-stündige Gezeitenwelle im Januar ist der im Dezember in Abbildung 14a ähnlich. Die Struktur über 0,1 K bei 45° bis 70° nördlicher Breite hat aber z.B. im Dezember erst oberhalb von 85 km Werte über 0,1 K und im Januar bereits ab 80 km.

Die Unterschiede zwischen El Niño und La Niña sind im Differenzbild in Abbildung 14e nur

gering. Unterhalb von 120 km Höhe liegen die Differenzen zwischen  $-0,3$  K und  $0,3$  K und darüber werden bis zu  $\pm 0,6$  K erreicht, dort überwiegen aber die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Von  $5^\circ$  bis  $35^\circ$  südlicher Breite von 50 km bis 110 km logarithmischer Druckhöhe und von  $60^\circ$  südlicher Breite bis zum Südpol von 70 km bis 120 km Höhe dominieren positive Differenzen. In der Stratosphäre von 20 km bis 50 km Höhe zwischen  $30^\circ$  südlicher Breite bis zum Südpol befindet sich ebenfalls eine Struktur mit positiven Differenzen mit Werten bis  $0,3$  K, wobei die Werte wegen der kleinen Amplituden in diesem Bereich wahrscheinlich weit unter  $0,3$  K liegen. Auf der Nordhalbkugel erstreckt sich ab 15 km Höhe eine ausgedehnte Struktur mit positiven Differenzen zwischen  $10^\circ$  und  $35^\circ$  nördlicher Breite bzw. ab 50 km logarithmischer Druckhöhe zwischen Äquator und  $60^\circ$  südlicher Breite. In diesem Bereich treten aber auch schon größere Strukturen mit negativen Differenzen auf z.B. von 45 km bis 80 km zwischen  $15^\circ$  und  $30^\circ$  nördlicher Breite bzw. ab 80 km nur noch von  $30^\circ$  bis  $35^\circ$  nördlicher Breite. Negative Differenzen dominieren von  $35^\circ$  bis  $75^\circ$  nördlicher Breite zwischen 15 km und 50 km Höhe sowie von  $50^\circ$  südlicher Breite bis  $10^\circ$  nördlicher Breite von 10 km bis 50 km Höhe aber dort treten auch schon größere positive Strukturen auf z.B. bei  $10^\circ$  bis  $25^\circ$  südlicher Breite von 15 km bis 42 km Höhe. Bei  $30^\circ$  bis  $65^\circ$  südlicher Breite von 50 km bis 120 km überwiegen ebenfalls negative Differenzen.

Vergleicht man das Differenzbild im Januar mit dem im Dezember in Abbildung 14d rechts erkennt man, dass zwischen 50 km und 120 km Höhe vom Äquator bis  $30^\circ$  südlicher Breite in beiden Monaten positive Differenzen dominieren und daneben von  $30^\circ$  bis  $50^\circ$  südlicher Breite ab 60 km bzw. ab 90 km Höhe von  $30^\circ$  bis  $45^\circ$  südlicher Breite negative Differenzen überwiegen. Es gibt aber auch einige Unterschiede z.B. von  $10^\circ$  bis  $35^\circ$  nördlicher Breite von 15 km bis 50 km überwiegen im Januar positive Differenzen und im Dezember negative Differenzen.

### 5.3 Februar

In diesem Abschnitt soll der Einfluss von El Niño und La Niña auf die Gezeitenwellen im Februar untersucht werden. Dazu werden wieder die Hintergrundfelder der Temperatur in Abbildung 9c und des zonalen Windes in Abbildung 10c im Februar betrachtet. Beide Abbildungen ähneln denen im Januar, wobei jeweils eine andere Farbskala berücksichtigt werden muss in den Differenzbildern. Sowohl für die Temperatur als auch den zonalen Wind gilt, dass die Differenzen zwischen El Niño und La Niña im Februar auf der Nordhalbkugel größer sind als im Januar. Im Februar gibt es auch größere Bereiche im Differenzbild, in denen p-Werte kleiner als 1% bzw. 5% erreicht werden. Im Differenzbild des Temperaturhintergrundfeldes fällt außerdem auf, dass im Februar die Differenzen ab 125 km Höhe negativ sind im Gegensatz zum Dezember und Januar. Man erkennt im Temperaturhintergrundfeld auch sehr gut die vierpolige Struktur mit niedrigeren Temperaturen am Äquator und höheren Temperaturen in der Stratosphäre und darüber genau umgekehrt, wozu auch das Hintergrundwindfeld passt. Die Ergebnisse stimmen insgesamt gut überein mit den Erwartungen (vgl. z.B. Sassi et al., 2004; Lu et al., 2011)

Als Erstes soll die ganztägige Gezeitenwelle im Februar untersucht werden. Abbildung 11c zeigt die Temperaturamplitude der ganztägigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 11f die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

Die Amplitude in Abbildung 11c erreicht Werte über  $0,5$  K am Äquator ab 18 km logarithmischer Druckhöhe bzw. ab 38 km in den mittleren und hohen südlichen Breiten. Auf der Nordhalbkugel werden, mit Ausnahme einer kleinen Struktur bei  $30^\circ$  bis  $35^\circ$  nördlicher Breite bei

knapp 35 km Höhe, ab 40 km Höhe in den mittleren Breiten Werte über 0,5 K erreicht. Die Amplitude steigt mit der Höhe an und sinkt in Richtung der höheren Breiten wieder ab. In der Thermosphäre ab 120 km logarithmischer Druckhöhe ist die Amplitude größer als 0,5 K über allen Breiten und es dominieren die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten. Die Amplitude steigt dann schnell an und hat am Äquator ab 135 km Höhe Werte über 30 K. In den höheren Breiten bis 80° nördlicher bzw. südlicher Breite werden Werte über 30 K in etwas größeren Höhen erreicht. Schwächere Maxima befinden sich am Äquator von 105 km bis 115 km logarithmischer Druckhöhe mit Werten bis zu 20 K und von 25° bis 45° südlicher Breite zwischen 115 km bis 125 km Höhe mit Werten von maximal 15 K. Weitere noch schwächere Maxima liegen am Äquator bis 5° nördlicher Breite von 42 km bis 48 km Höhe und bei 35° bis 50° nördlicher Breite um 50 km logarithmischer Druckhöhe sowie im Bereich von 25° bis 50° südlicher Breite von 42 km bis 52 km Höhe, wobei jeweils Werte bis zu 5 K erreicht werden können. Insgesamt ist die Ausbreitung der ganztägigen Gezeitenwelle am Äquator am effektivsten und zwischen 60 km und 100 km logarithmischer Druckhöhe ist die Amplitude nur im Bereich zwischen 65° südlicher Breite und 70° nördlicher Breite größer als 0,5 K, also ist die Ausbreitung in diesem Höhenbereich eingeschränkt. Die maximale Standardabweichung beträgt 1,2 K.

Die ganztägige Gezeitenwelle im Februar ähnelt der im Januar in Abbildung 11b. Allerdings werden im Februar zum Teil größere Amplituden als im Januar erreicht und die Amplituden haben eine größere Ausdehnung. Zum Beispiel erreicht das Maximum am Äquator um 110 km logarithmischer Druckhöhe im Januar nur Werte bis 15 K im Februar aber bis 20 K. Die maximale Standardabweichung im Februar ist auch um 0,4 K kleiner als im Januar, d.h. die Abweichung vom Mittelwert in den einzelnen Läufen war im Februar geringer.

Im Differenzbild im Februar in Abbildung 11f liegen die Werte bis in 100 km logarithmischer Druckhöhe zwischen -0,3 K und 0,3 K und darüber zwischen -2,1 K und 1,8 K. Von 5° nördlicher Breite bis zum Nordpol von 15 km bis 38 km Höhe und ab 38 km bis 90 km Höhe von 65° nördlicher Breite bis zum Nordpol überwiegen positive Differenzen. Auch auf der Südhalbkugel von 20° südlicher Breite bis zum Südpol in 10 km bis 38 km Höhe befindet sich eine Struktur mit positiven Differenzen. Weitere Strukturen, bei denen die Amplitude während El Niño größer ist als während La Niña, befinden sich zwischen 45° südlicher Breite und dem Südpol von 62 km bis 115 km Höhe und zwischen 30° südlicher Breite und 15° südlicher Breite von 62 km bis 120 km. Bei der zweiten Struktur werden dabei ab 108 km bis 120 km logarithmischer Druckhöhe zwischen 5° und 25° südlicher Breite auch Differenzen bis 1,2 K erreicht. Positive Differenzen überwiegen auch von 30° bis 60° nördlicher Breite von 90 km bis 120 km Höhe, wobei ab 110 km auch hier Differenzen bis 1,2 K erreicht werden. Negative Werte dominieren zwischen 20° südlicher Breite und dem Südpol von 38 km bis 50 km Höhe und äquivalent dazu auf der Nordhalbkugel vom Äquator bis 75° nördlicher Breite zwischen 38 km und 50 km Höhe. Eine weitere Struktur mit negativen Differenzen befindet sich zwischen Äquator und 25° nördlicher Breite von 100 km bis 120 km logarithmischer Druckhöhe mit Werten bis -1,2 K in 118 km Höhe und ab 100 km Höhe werden bereits Werte bis -0,6 K angenommen.

Der Vergleich mit dem Differenzbild im Januar in Abbildung 11e zeigt, dass im Februar bis in 120 km Höhe größere Differenzen von -1,2 K bis 1,2 K auftreten, während im Januar nur Werte von -0,6 K bis 0,6 K erreicht werden. In beiden Monaten treten zwischen 30° südlicher Breite und dem Südpol von 15 km bis 38 km Höhe positive Differenzen auf und darüber negative Differenzen. Auch auf der Nordhalbkugel von 30° nördlicher Breite bis zum Nordpol sowie im Bereich von 5° südlicher Breite bis 30° nördlicher Breite von 70 km bis 110 km logarithmischer Druckhöhe dominieren im Januar und Februar positive Differenzen.

Im nächsten Abschnitt soll der Einfluss auf die halbtägige Gezeitenwelle im Februar untersucht werden. Abbildung 12c zeigt die Temperaturamplitude der halbtägigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 12f die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

Erste Strukturen mit Amplituden über 0,5 K treten in Abbildung 12c zwischen Äquator und 25° südlicher Breite bei 42 km bis 52 km logarithmischer Druckhöhe auf. Darüber sind die Amplituden kleiner als 0,5 K und erst ab 65 km Höhe in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel werden wieder Werte über 0,5 K erreicht bzw. zwischen 5° und 20° südlicher Breite ab 68 km logarithmischer Druckhöhe. Bis 105 km Höhe nimmt die Amplitude nur im Bereich von 40° südlicher Breite bis 60° nördlicher Breite Werte über 0,5 K an. Die Amplitude steigt dann wieder mit der Höhe, da die Luftdichte abnimmt und nimmt in Richtung höhere Breiten ab. In-situ Anregungen in der Thermosphäre führen dazu, dass ab 120 km logarithmischer Druckhöhe zwischen 85° südlicher Breite und 85° nördlicher Breite die Amplitude über alle Breiten größer als 0,5 K ist. Die Amplitude steigt dann sehr schnell mit der Höhe an und ab 135 km Höhe werden Werte über 30 K erreicht zwischen dem Äquator und 15° nördlicher Breite. In Richtung höherer Breiten auf der Nordhalbkugel werden auch Amplituden über 30 K erreicht aber erst bei größeren Höhen über 135 km. Ein schwaches lokales Maximum befindet sich bei 5° nördlicher Breite bis 15° südlicher Breite in 70 km bis 80 km logarithmischer Druckhöhe. Die Standardabweichung erreicht erst ab 110 km Höhe bei 50° südlicher Breite bis 85° nördlicher Breite Werte über 0,4 K, darunter liegt die Standardabweichung unterhalb von 0,4 K aber die Amplituden sind auch insgesamt geringer. Die maximale Standardabweichung beträgt 1,6 K.

Die Strukturen der halbtägigen Gezeitenwelle im Februar ähneln der im Januar in Abbildung 12b. Es kommt zu kleineren Abweichungen z.B. hat die Struktur zwischen Äquator und 25° südlicher Breite mit Werten bis 0,5 K im Januar eine größere Ausdehnung als im Februar. Dafür hat die Struktur zwischen 30° und 60° südlicher Breite oberhalb von 65 km logarithmischer Druckhöhe im Februar eine größere Ausdehnung.

Die Unterschiede im Differenzbild in Abbildung 12f unterhalb von 98 km logarithmischer Druckhöhe sind gering im Bereich von -0,3 K bis 0,3 K. Oberhalb von 98 km Höhe treten Differenzen von -1,8 K bis 1,8 K auf, allerdings sind dann ab 120 km Höhe vor allem die in der Thermosphäre angeregten Gezeiten dominant. Im Bereich vom Äquator bis 60° südlicher Breite bis in 35 km logarithmischer Druckhöhe und von 50° nördlicher Breite bis zum Nordpol bis in 22 km logarithmischer Druckhöhe sind die Unterschiede hauptsächlich positiv mit Werten bis 0,3 K. Im Bereich von 20° bis 35° nördlicher Breite treten ebenfalls Strukturen mit positiven Differenzen auf, welche sich ab 22 km Höhe dann bis 5° nördlicher Breite ausdehnen und ab 38 km Höhe bis 10° südlicher Breite. Auf der Südhalbkugel dominieren zwischen Äquator und Südpol von 50 km bis 130 km Höhe positive Differenzen mit Werten bis 0,3 K. Das heißt, dass in diesem Bereich die Amplitude während El Niño größer ist als während La Niña. Dazwischen treten allerdings auch immer wieder kleinere negative Strukturen auf mit bis zu -0,3 K. Ab 98 km logarithmischer Druckhöhe treten zwischen 10° und 40° südlicher Breite auch größere positive Werte auf bis zu 1,6 K bei 122 km Höhe. Zwischen 15° und 25° nördlicher Breite ab 100 km bzw. ab dem Äquator oberhalb von 115 km Höhe treten auch stärkere positive Differenzen mit Werten bis 1,8 K auf. Zwischen 30° und 55° nördlicher Breite von 80 km bis 110 km Höhe und auf der Südhalbkugel von 55° südlicher Breite bis zum Südpol bis 30 km Höhe sind die auftretenden Differenzen hauptsächlich negativ, wobei auch immer wieder kleinere positive Strukturen vorkommen. Stärkere negative Werte bis -1,8 K werden zwischen Äquator und 10°

südlicher Breite ab 112 km logarithmischer Druckhöhe erreicht.

Abbildung 12e der halbtägigen Gezeitenwelle im Januar zeigt einige Gemeinsamkeiten mit der der halbtägigen Gezeitenwelle im Februar auf. Vor allem auf der Südhalbkugel treten in beiden Monaten zwischen Äquator und 60° südlicher Breite bis 30 km Höhe und im Bereich von 15° bis 75° zwischen 50 km und 120 km Höhe positive Werte auf, während zwischen 30° und 60° nördlicher Breite von 70 km bis 100 km Höhe negative Differenzen dominieren.

Anschließend wird nun die 8-stündige Gezeitenwelle im Februar analysiert. Abbildung 13c zeigt die Temperaturamplitude der 8-stündigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 13f die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

In Abbildung 13c treten erste Strukturen mit einer Amplitude größer als 0,1 K zwischen 10° nördlicher Breite und 15° südlicher Breite ab 38 km logarithmischer Druckhöhe auf. Die Amplitude weist dann bis in eine Höhe von 78 km nur im Bereich von 60° südlicher Breite bis 35° nördlicher Breite Werte über 0,1 K auf. Oberhalb von 90 km bei 20° südlicher Breite und ab 95 km bei 20° nördlicher Breite werden dann Werte über 0,5 K erreicht, da die Amplitude wieder mit der Höhe wächst. Ab 110 km logarithmischer Druckhöhe steigt die Amplitude dann schnell mit der Höhe, sodass ab 130 km Höhe in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel Werte über 10 K auftreten, wobei dort bereits die Gezeitenwellen, die in der Thermosphäre angeregt wurden dominieren. Bei 5° bis 15° südlicher Breite befindet sich noch ein Maximum mit Werten bis 6 K zwischen 115 km und 120 km Höhe. Die Standardabweichung erreicht erst ab 125 km Höhe Werte über 0,4 K zwischen 30° südlicher Breite und 70° nördlicher Breite. Die maximale Standardabweichung beträgt 0,7 K und ist damit geringer als im Januar in Abbildung 13b. Außerdem tritt im Januar auch eine Struktur mit einer Amplitude bis 0,5 K zwischen 30° und 60° nördlicher Breite auf während im Februar die Amplitude in diesem Bereich unter 0,1 K liegt.

Die Unterschiede im Differenzbild in Abbildung 13f liegen unterhalb von 110 km im Bereich von -0,3 K bis 0,3 K und oberhalb von 110 km zwischen -1,6 K bis 1,6 K. Vom Äquator bis 30° südlicher Breite zwischen 20 km und 115 km befinden sich hauptsächlich positive Differenzen mit Werten bis zu 0,3 K ebenso wie im Januar in Abbildung 13e. Im äquivalenten Bereich auf der Nordhalbkugel sind die Unterschiede vor allem negativ zwischen 20 km und 90 km logarithmischer Druckhöhe und positiv von 90 km bis 120 km, wobei ab 115 km auch Werte bis 0,6 K auftreten. Die Differenzen unterhalb von 90 km müssen aber sehr geringe absolute Werte haben, da die Amplitude während El Niño maximal Werte bis 0,5 K erreicht. Zwischen 30° und 60° nördlicher Breite von 50 km bis 95 km sowie zwischen 30° bis 70° südlicher Breite von 100 km bis 160 km treten Strukturen mit positiven Differenzen auf, wobei bei der zweiten Struktur ab 120 km auch größere positive Differenzen über 0,3 K auftreten. Negative Werte dominieren zwischen 50° südlicher Breite und 35° nördlicher Breite von 10 km bis 35 km logarithmischer Druckhöhe und im Bereich von 20° bis 70° südlicher Breite von 60 km bis 80 km.

Als Letztes soll die 6-stündige Gezeitenwelle im Februar betrachtet werden. Abbildung 13c zeigt die Temperaturamplitude der 6-stündigen Gezeitenwelle im Januar während El Niño und Abbildung 13f die Differenz zwischen El Niño und La Niña.

Die Amplitude der 6-stündigen Gezeitenwelle während El Niño in Abbildung 14c ist im Allgemeinen kleiner als die der 8-stündigen Gezeitenwelle im Februar. Eine erste Struktur mit Werten über 0,1 K befindet sich zwischen Äquator und 40° nördlicher Breite in 45 km bis 55 km logarithmischer Druckhöhe. Darüber ist die Amplitude wieder kleiner als 0,1 K und erreicht

erst wieder Werte über 0,1 K ab 60 km Höhe bei 50° bis 55° nördlicher Breite bzw. ab 75 km logarithmischer Druckhöhe bei 45° bis 60° südlicher Breite. Die Amplitude steigt dann mit der Höhe und hat in Richtung der Pole kleinere Werte, sodass nur zwischen 75° südlicher Breite bis 80° nördlicher Breite die Amplitude Werte über 0,1 K annimmt. Die Werte liegen ab 95 km Höhe in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel und oberhalb von 105 km Höhe in den mittleren Breiten auf der Südhalbkugel über 0,5 K. Ab 110 km werden in den mittleren Breiten auf der Nordhalbkugel auch Amplituden mit bis zu 4 K erreicht. Ein schwaches Maxima befindet sich bei 5° bis 10° südlicher Breite bei 110 km bis 120 km logarithmischer Druckhöhe mit Werten bis zu 4 K. Maxima der Amplitude mit über 10 K werden etwas oberhalb von 130 km und ab 142 km logarithmischer Druckhöhe auf der Nordhalbkugel erreicht, wo bereits die in der Thermosphäre angeregten Gezeitenwellen dominieren. Die Standardabweichung hat ein Maximum von 0,7 K und erreicht nur Werte über 0,4 K ab 130 km Höhe zwischen 35° südlicher Breite und 25° nördlicher Breite.

Ein Vergleich mit der 6-stündigen Gezeitenwelle im Januar in Abbildung 14b ergibt, dass während Februar größere Amplituden erreicht werden. So nimmt die Amplitude im Februar ab knapp 110 km Höhe Werte bis 4 K an und im Januar erst ab 120 km. In beiden Monaten gab es die Struktur mit einer Amplitude bis 0,1 K zwischen Äquator und 30° nördlicher Breite um 50 km logarithmischer Druckhöhe, darüber wurden im Januar erst ab 80 km Höhe wieder Werte über 0,1 K erreicht und im Februar bereits ab 60 km Höhe.

Unterhalb von 118 km logarithmischer Druckhöhe in Abbildung 14f werden nur Werte zwischen -0,3 K und 0,3 K angenommen und darüber von -0,9 K bis 0,9 K. Von 20° bis 80° südlicher Breite dominieren von 10 km bis 50 km Höhe positive Differenzen. Im Bereich von 5° bis 40° nördlicher Breite von 18 km bis 60 km Höhe bzw. von 5° bis 50° nördlicher Breite von 60 km bis 120 km logarithmischer Druckhöhe überwiegen ebenfalls positive Differenzen, wobei ab 118 km Höhe Werte bis 0,6 K erreicht werden. In diesem Bereich von 18 km bis 50 km Höhe traten im Januar in Abbildung 14e ebenfalls hauptsächlich positive Differenzen auf. Strukturen mit negativen Differenzen befinden sich bei 30° bis 70° nördlicher Breite bis 60 km Höhe und bei 20° südlicher Breite bis 10° nördlicher Breite von 10 km bis 70 km Höhe bzw. ab 50 km logarithmischer Druckhöhe nur noch zwischen 10° südlicher Breite bis 5° nördlicher Breite. Negative Differenzen dominieren von 30° bis 65° südlicher Breite von 50 km bis 80 km Höhe bzw. ab 80 km Höhe zwischen 30° und 45° südlicher Breite und im Bereich ab 75 km Höhe zwischen 45° und 60° nördlicher Breite bzw. ab 120 km von 40° bis 65° nördlicher Breite, wobei oberhalb von 120 km auch Werte bis -0,6 K angenommen werden.

## 5.4 Überblick

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse zum Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Gezeitenwellen im Winter noch einmal kurz zusammengefasst. Dabei wird sich hier nur auf den Bereich bis in 120 km logarithmischer Druckhöhe beschränkt.

Die größten Differenzen zwischen El Niño und La Niña treten bei der Temperaturamplitude der ganztägigen und halbtägigen Gezeitenwelle auf. Bei der 8-stündigen und 6-stündigen Gezeitenwelle sind die Differenzen geringer aber die Amplituden sind ebenfalls kleiner. Bei der 6-stündigen Gezeitenwelle liegen die Differenzen bis 120 km Höhe im Bereich von -0,3 K bis maximal 0,6 K.

Im Hintergrundtemperaturfeld treten die größten Differenzen zwischen El Niño und La Niña im Februar auf mit Werten von -4 K bis 4 K. Die kleinsten Differenzen treten im Januar auf mit -2

K bis 3 K. Im Hintergrundfeld kann man auch die Entwicklung einer vierpoligen Struktur auf der Nordhalbkugel beobachten, die von Dezember bis zum Februar zunehmend stärker wird. Wie beim Temperaturhintergrundfeld treten bei der ganztägigen Gezeitenwelle im Februar die größten Differenzen auf zwischen -1,2 K und 1,2 K und im Januar die kleinsten Differenzen mit Werten von -0,6 K bis 0,6 K. Bei der 6-stündigen und halbtägigen Gezeitenwelle sind die Differenzen im Februar auch am größten mit -0,3 K bis 0,6 K für die 6-stündige Gezeitenwelle und -1,6 K bis 1,8 K für die halbtägige Gezeitenwelle. Bei der 6-stündigen Gezeitenwelle sind die Differenzen im Dezember und Januar gleich groß zwischen -0,3 K bis 0,3 K und bei der halbtägigen Gezeitenwelle sind die Differenzen im Dezember am geringsten mit Werten von -0,8 K bis 1,6 K. Bei der 8-stündigen Gezeitenwelle sind wie bei dem Hintergrundtemperaturfeld die Differenzen im Januar am geringsten zwischen -0,3 K bis 0,6 K und im Dezember und Februar sind die Differenzen gleich groß mit Werten von -0,6 K bis 0,6 K. Das bedeutet, dass unterschiedlich starke Effekte im Hintergrund auch zu unterschiedlich starken Effekten bei den Gezeitenwellen führen.

## 6 Vergleich mit der Literatur

Im Folgenden sollen die Ergebnisse mit WACCM Simulationen von Pedatella und Liu (2013) und GAIA Simulationen von Liu et al. (2017) verglichen werden.

Pedatella und Liu (2013) haben mittels WACCM Simulationen die Gezeitenänderungen der Temperatur der ganztägigen migrierenden und noch weiterer nicht-migrierender Gezeitenwellen während El Niño und La Niña in 110 km Höhe für November bis April untersucht. Da MUAM momentan nur migrierende Gezeitenwellen enthält, soll nun lediglich die ganztägige Gezeitenwelle im Dezember, Januar und Februar mit den Ergebnissen von Pedatella und Liu (2013, Abbildung 3) in 110 km Höhe verglichen werden.

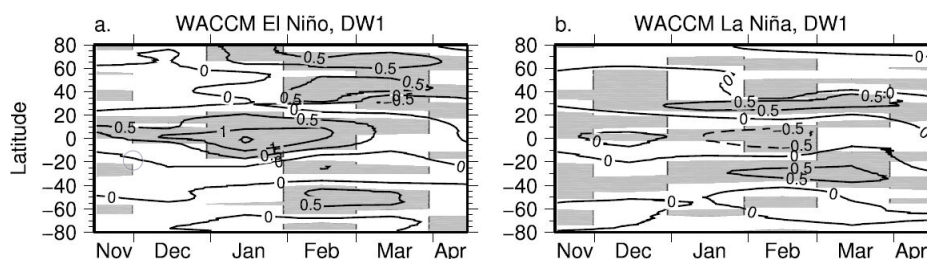


Abbildung 15 Temperaturanomalien der ganztägigen Gezeitenwelle in 110 km Höhe von WACCM Simulationen während El Niño und La Niña von Pedatella und Liu (2013)

Im Dezember befindet sich in 110 km Höhe am Äquator bis 20° südlicher bzw. nördlicher Breite in den WACCM Simulationen in Abbildung 15 eine positive Anomalie während El Niño und es treten keine Anomalien während La Niña auf. Dies stimmt mit den Ergebnissen von MUAM in Abbildung 11d vom Äquator bis 20° südlicher Breite überein, wo Differenzen bis 0,6 K auftreten. Sonst sind bei Pedatella und Liu (2013) die Anomalien im Dezember klein und auch bei den Ergebnissen von MUAM treten bei 110 km Höhe sonst nur Differenzen im Intervall von -0,3 K bis 0,3 K auf.

Im Januar kommen bei WACCM zwischen 20° südlicher Breite und 20° nördlicher Breite während El Niño negative Anomalien bis 1 K vor und während La Niña Anomalien bis -0,5 K. Bei MUAM sind die Differenzen zwischen El Niño und La Niña in diesem Bereich in Abbildung 11e aber nur schwach positiv mit Werten bis 0,3 K. Zwischen 20° und 40° nördlicher Breite sind die Anomalien während La Niña positiv bis 0,5 K und während El Niño treten keine Anomalien auf. Dies entspricht von 15° bis 30° nördlicher Breite gut den Ergebnissen von MUAM mit Differenzen bis -0,3 K. Von 30° bis 40° südlicher Breite sind die Werte in MUAM jedoch positiv. In den höheren Breiten von 60° bis 80° nördlicher Breite sind die Anomalien während El Niño in WACCM schwach bis zu 0,5 K und während La Niña treten keine Anomalien auf. Dies entspricht gut den Ergebnissen von MUAM, wo Differenzen bis 0,3 K vorkommen.

Im Februar treten bei WACCM vom Äquator bis 20° südlicher bzw. nördlicher Breite während El Niño Anomalien bis 0,5 K auf und während La Niña bis -0,5 K. Dies passt gut zu den Ergebnissen von MUAM in Abbildung 11f, da die Differenzen in diesem Bereich ebenfalls positiv sind mit Werten bis 0,6 K. Von 60° bis 80° nördlicher Breite und 40° bis 60° südlicher Breite befinden sich jeweils während El Niño Anomalien bis 0,5 K und während La Niña keine, was gut mit den MUAM Ergebnissen übereinstimmt mit Differenzen jeweils bis 0,3 K. Zwischen 20° und 40° nördlicher Breite sind die Anomalien in den WACCM Simulationen während El



Niño und La Niña positiv mit jeweils 0,5 K aber bei MUAM sind die Differenzen von 20° bis 25° nördlicher Breite negativ mit bis zu -0,6 K und von 25° bis 40° nördlicher Breite positiv mit Werten bis 0,3 K. Auch im Bereich von 40° bis 60° nördlicher Breite und von 20° bis 40° südlicher Breite stimmen WACCM und MUAM nicht gut überein. Im ersten Bereich treten bei WACCM während El Niño Anomalien bis 0,5 K auf und während La Niña keine, während bei MUAM die Differenzen negativ sind bis -0,3 K. Im zweiten Bereich werden während La Niña Anomalien bei WACCM bis 0,5 K erreicht und während El Niño keine, dabei treten bei MUAM in diesem Bereich abwechselnd positive und negative Differenzen auf.

Oftmals stimmten die Ergebnisse zwischen MUAM und WACCM also gut überein, wobei die bei MUAM auftretenden Differenzen immer kleiner waren, als von den WACCM Anomalien erwartet. Diese Abweichungen können durch die verschiedenen Modelle auftreten. Während bei MUAM ERA-5 Reanalysedaten verwendet werden, läuft WACCM komplett frei. Ursachen für die Abweichungen der Gezeiten zwischen El Niño und La Niña liegen nach Pedatella und Liu (2013) in den Änderungen in der troposphärischen bzw. stratosphärischen Anregung und durch Änderungen in den zonal gemittelten Hintergrundfeldern.

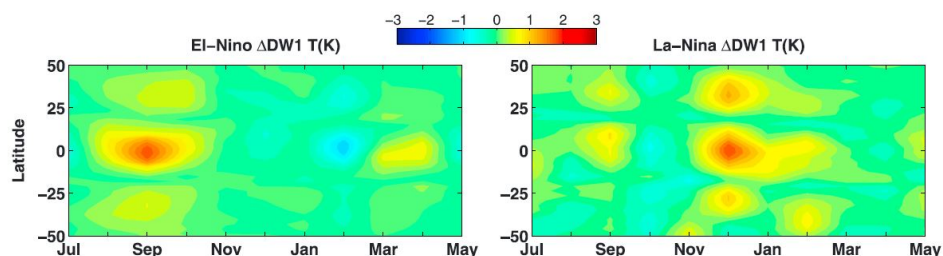


Abbildung 16 Temperaturanomalien der ganztägigen Gezeitenwelle von GAIA Simulationen während El Niño und La Niña von Liu et al. (2017)

Nun sollen die Ergebnisse noch mit GAIA Simulationen von Liu et al. (2017) verglichen werden. Liu et al. (2017) führten Simulationen der ganztägigen Gezeitenwelle durch Nutzung von Reanalysedaten von 21 Jahren durch. Die Ergebnisse in 100 km Höhe von Liu et al. (2017, Abbildung 6) der ganztägigen migrierenden Gezeitenwelle sollen nun mit den Ergebnissen von MUAM kurz verglichen werden. Im Dezember in Abbildung 16 befinden sich bei GAIA am Äquator während El Niño negative Anomalien und während La Niña positive Anomalien während bei MUAM in Abbildung 11d zwischen 10° südlicher Breite und 10° nördlicher Breite Differenzen bis -0,3 K auftreten. Ähnlich ist es im Februar am Äquator, dort treten bei GAIA während El Niño wieder negative Anomalien auf und während La Niña positive. Bei MUAM sind die Differenzen in Abbildung 11f vom Äquator bis 15° nördlicher Breite negativ mit Werten bis -0,6 K. Im Januar stimmen die Ergebnisse von MUAM und GAIA nicht gut überein und allgemein stellt man fest, dass die auftretenden Differenzen bei MUAM geringer sind, als sie von den Anomalien bei GAIA erwartet werden.

## 7 Zusammenfassung

Im letzten Abschnitt sollen die wichtigsten Ergebnisse der MUAM Simulationen jetzt noch zusammengefasst werden. Die verschiedenen Gezeitenwellen haben unterschiedlich auf El Niño und La Niña reagiert. Dabei waren die Differenzen zwischen El Niño und La Niña bis 100 km logarithmischer Druckhöhe im Allgemeinen klein mit Werten zwischen -0,3 K bis 0,3 K. Die absoluten Werte müssen teilweise aber viel kleiner gewesen sein, vor allem bei den 8-stündigen und 6-stündigen Gezeitenwellen deren Amplitude unter 100 km Höhe nur gering war während El Niño und La Niña.

Die größte Amplitude in der mittleren Atmosphäre während El Niño hatte i.Allg. die ganztägige Gezeitenwelle und mit sinkender Periode der Gezeitenwellen sind die Amplituden auch zunehmend kleiner geworden. Man beobachtete bei allen Gezeitenwellen bei der Amplitude während El Niño auch den erwarteten Verlauf, dass die Amplitude mit der Höhe ansteigt und in Richtung der Pole abnimmt. Dabei dominierten ab 120 km Höhe die in der Thermosphäre angeregten Gezeitenwellen. Die Strukturen der einzelnen Gezeiten haben sich in den einzelnen Monaten stark geähnelt, wobei es aber immer auch zu kleineren Abweichungen kam.

In den Differenzbildern gab es Bereiche, bei denen die Differenzen der Gezeitenwellen in allen Monaten ungefähr gleich geblieben sind, während es in anderen Bereichen zu größeren Änderungen kam. Teilweise waren die Differenzen auf beiden Hemisphären auch symmetrisch allerdings kam es häufig auch zu größeren Unterschieden. Die maximale und die minimale Differenz bis 120 km Höhe sind bei der halbtägigen Gezeitenwelle im Februar aufgetreten um den Äquator knapp unterhalb von 120 km mit Extremwerten von -1,5 K und 1,8 K. Im Februar traten auch die kleinsten Standardabweichungen auf, d.h. die einzelnen Läufe lagen da am engsten um den Mittelwert. Die Unterschiede zwischen El Niño und La Niña lassen sich dabei durch Änderungen in der Anregung der Gezeitenwellen und durch Änderungen in den zonal gemittelten Hintergrundfeldern erklären.

Der Vergleich der Ergebnisse mit WACCM und GAIA zeigte im Allgemeinen eine gute Übereinstimmung vor allem mit WACCM, allerdings waren die in MUAM auftretenden Differenzen zwischen El Niño und La Niña kleiner als von den Anomalien von WACCM und GAIA erwartet.

## 8 Ausblick

In dieser Arbeit wurden zur Untersuchung des Einflusses von El Niño-Southern Oscillation auf die Gezeitenwellen Simulationen mit dem Modell MUAM durchgeführt. Dazu wurden ERA-5 Reanalysedaten von jeweils fünf Wintern mit El Niño und fünf Wintern mit La Niña Bedingungen genutzt. Um noch bessere statistische Ergebnisse zu erhalten, sollte man nicht nur jeweils fünf Winter nutzen sondern noch mehr Ereignisse. Dann könnte man auch zusätzlich untersuchen wie der Einfluss auf die Gezeitenwellen bei verschiedenen starken Warm- bzw. Kaltereignissen variiert.

Um den Einfluss von El Niño-Southern Oscillation auf die Gezeiten zu untersuchen, wurden bereits Simulationen mittels WACCM und GAIA durchgeführt (vgl. Pedatella und Liu, 2013, 2012; Liu et al., 2017). Dabei erhielten Pedatella und Liu (2012) die größte Antwort der Gezeitenwellen auf El Niño-Southern Oscillation bei den nicht-migrierenden ganztägigen Gezeitenwellen mit zonaler Wellenzahl 2 und 3 und bei der nicht-migrierenden halbtägigen Gezeitenwelle mit zonaler Wellenzahl 4 sowie der migrierenden ganztägigen Gezeitenwelle. Deswegen sollten nicht nur migrierende Gezeitenwellen untersucht werden, sondern auch nicht-migrierende Gezeiten sollten im Modell eingefügt werden und analysiert werden. Dazu müsste man eine latente Wärmefreigabe im Modell implementieren.

Nach Liu et al. (2017) gibt es auch Unterschiede in der Gezeitenantwort von Temperatur, zonalen Wind und meridionalen Wind auf El Niño-Southern Oscillation. Hier wurde nur der Einfluss auf die Temperatur analysiert, man könnte aber auch den zonalen Wind und meridionalen Wind noch näher betrachten. Die entsprechenden Bilder dazu befinden sich im Anhang.

## Literatur

- Andrews, D., Holton, J., und Leovy, C.: Middle Atmosphere Dynamics, Academic Press Inc. (London) Ltd., 489, 1987.
- Domelsen, D., Garfinkel, C., und Butler, A.: The Teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the Stratosphere, *Reviews of Geophysics*, 57, doi:10.1029/2018RG000596, 5-47, 2019.
- Ermakova, T., Statnaya, I. A., Fedulina, I. N., Suvorova, E. V., und Pogoreltsev, A. I.: Three-dimensional semi-empirical climate model of water vapor distribution and its implementation to the radiation module of the middle and upper atmosphere model, *Russian Meteorology and Hydrology*, 42, doi:10.3103/S1068373917090060, 594-600, 2017.
- Forbes, J. M.: Tidal and Planetary Waves, American Geophysical Union, doi:10.1029/GM087p0067, 67-87, 1995.
- Fröhlich, K.: The Quasi Two-Day Wave - it's impact on the zonal mean circulation and wave-wave interactions in the middle atmosphere, Dissertation, Universität Leipzig, 35, 2005.
- Garcia-Herrera, R., Calvo, N., Garcia, R., und Giorgetta, M.: Propagation of ENSO temperature signals into the middle atmosphere: A comparison of two general circulation models and ERA-40 reanalysis data, *Journal of Geophysical Research*, 111, doi:10.1029/2005JD006061, D06101, 2006.
- Geißler, C., Jacobi, C., und Lilienthal, F.: Forcing mechanisms of the migrating quarterdiurnal tide, *Annales Geophysicae*, 38, doi:10.5194/angeo-38-527-2020, 527-544, 2020.
- Hong, S.-S. und Lindzen, R. S.: Solar Semidiurnal Tide in the Thermosphere, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 33, 135-153, 1975.
- Hood, L., Soukharev, B., und McCormack, J.: Decadal variability of the tropical stratosphere: Secondary influence of the El Niño–Southern Oscillation, *Journal of Geophysical Research*, 115, doi:10.1029/2009JD012291, D11113, 2010.
- Iza, M., Calvo, N., und Manzini, E.: The Stratospheric Pathway of La Niña, *American Meteorological Society*, 29, doi:0.1175/JCLI-D-16-0230.1, 8899-8913, 2016.
- Jacobi, C., Ermakova, T., Mewes, D., und Pogoreltsev, A.: El Niño influence on the mesosphere/lower thermosphere circulation at midlatitudes as seen by a VHF meteor radar at Collm (51.3°N, 13°E), *Advances in Radio Science*, 15, doi:10.5194/ars-15-1-2017, 1-8, 2017.
- Jacobi, C., Geißler, C., Lilienthal, F., und Krug, A.: Forcing mechanisms of the 6 h tide in the mesosphere/lower thermosphere, *Advances in Radio Science*, 16, doi:10.5194/ars-16-141-2018, 141-147, 2018.
- Kasang, D.: Rossby- und Kelvinwellen oder der "Delayed Oscillator", URL <https://bildungsserver.hamburg.de/ozean-und-klima/4337350/enso-wellen-artikel/>, Stand: 25.05.2020, 2020.

- Labitzke, K. G.: Die Stratosphäre, Springer-Verlag, 83-87, 1999.
- Lange, M.: Modellstudien zum CO<sub>2</sub>-Anstieg und O<sub>3</sub> -Abbau in der mittleren Atmosphäre und Einfluss des Polarwirbels auf die zonale Symmetrie des Windfeldes in der Mesopausenregion, Dissertation, Universität Leipzig, 2001.
- Latif, M.: Das El Niño/Southern Oscillation-Phänomen, promet - Meteorologische Fortbildung, Das Klima und Wetter der Tropen , Heft 3/4, 123-129, 2006.
- Lau, K.-M. und Yang, S.: Walker Circulation, Elsevier Science Ltd., doi:10.1006/rwas.2002.0450, 2002.
- Li, T., Calvo, N., Yue, J., Russell, J., Smith, A., Mlynczak, M., Chandran, A., Dou, X., und Liu, A.: Southern Hemisphere Summer Mesopause Responses to El Niño–Southern Oscillation, American Meteorological Society, 29, doi:10.1175/JCLI-D-15-0816.1, 6319-6328, 2016.
- Lilienthal, F.: Analysis of the Forcing Mechanisms of the Terdiurnal Solar Tide in the Middle Atmosphere, Dissertation, Universität Leipzig, 167, 2019.
- Liu, H., Sun, Y.-Y., Miyoshi1, Y., und Jin, H.: ENSO effects on MLT diurnal tides: A 21 year reanalysis data-driven GAIA model simulation, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 122, doi:10.1002/2017JA024011, 5539–5549, 2017.
- Lu, C., Liu, Y., , und Liu, C.: Middle Atmosphere Response to ENSO Events in Northern Hemisphere Winter by the Whole Atmosphere Community Climate Model, Atmosphere-Ocean, 49, doi:10.1080/07055900.2011.576451, 95-111, 2011.
- MacPhaden, M. J.: Encyclopedia of global environmental change, Vol. Volume 1, Kap. El Niño and La Niña: causes and global consequences, S. 353–370, WILEY, 18, 2002.
- Meyer, S.: Temperaturstruktur und Gezeiten der polaren Mesosphäre-Experimentelle Untersuchungen mittels Doppler–Lidar, Masterarbeit, Universität Rostock, 7-8, 2009.
- Parish, H. F., Fuller-Rowell, T. J., und Rees, D.: Numerical Simulations of propagating Tides in the Thermosphere, Advances in Space Research, 12, (6)117-(6)135, 1992.
- Pedatella, N. M. und Liu, H.-L.: Tidal variability in the mesosphere and lower thermosphere due to the El Niño–Southern Oscillation, Geophysical Research Letters, 39, doi:10.1029/2012GL053383, L19802, 2012.
- Pedatella, N. M. und Liu, H.-L.: Influence of the El Niño Southern Oscillation on the middle and upper atmosphere, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 118, doi:10.1002/jgra.50286, 2744–2755, 2013.
- Pogoreltsev, A., Vlasova, A., Fröhlich, K., und Jacobi, C.: Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69, doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014, 2083-2101, 2007.
- Sassi, F., Kinnison, D., B. A. Boville, R. R. G., und Roble, R.: Effect of El Nino-Southern Oscillation on the dynamical, thermal, and chemical structure of the middle atmosphere, Journal of Geophysical Research, 109, doi:10.1029/2003JD004434, D17108, 2004.

- Suvorova, E. und Pogoreltsev, A.: Modeling of nonmigrating tides in the middle atmosphere, Geomagnetism and Aeronomy, 51, doi:10.1134/S0016793210061039, 105-115, 2011.
- Taguchi, M.: Observed connection of the stratospheric quasi-biennial oscillation with El Niño–Southern Oscillation in radiosonde data, Journal of Geophysical Research, 115, doi: 10.1029/2010JD014325, D18120, 2010.
- Taguchi, M. und Hartmann, D.: Increased Occurrence of Stratospheric Sudden Warmings during El Niño as Simulated by WACCM, Journal of Climate, 19, 324-332, 2006.
- van Loon, H. und Labitzke, K.: The Southern Oscillation. Part V: The anomalies in the lower stratosphere of the northern hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial-Oscillation, Monthly Weather Review, 115, 357-369, 1986.
- Weinberger, I., Garfinkel, C. I., White, I. P., und Oman, L. D.: The salience of nonlinearities in the boreal winter response to ENSO: Arctic stratosphere and Europe, Climate Dynamics, 53, doi:0.1007/s00382-019-04805-1, 4591-4610, 2019.

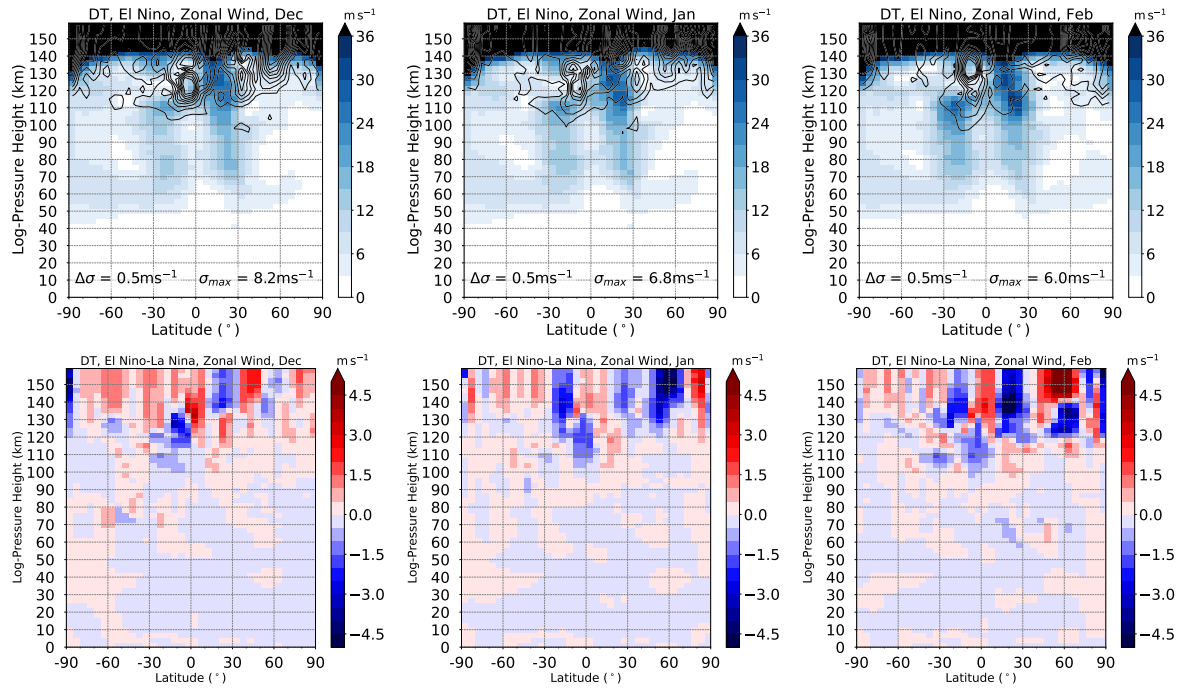
## Abbildungsverzeichnis

1	Tägliche Sonnenerwärmung schwarz, ganztägige Gezeiten (DT) grün, halbtägige Gezeiten (SDT) gelb, 8-stündige Gezeiten (TDT) rot von Lilienthal (2019). Die harmonischen Anteile sind dabei um 10 K verschoben. . . . .	2
2	Normalisierte erste symmetrische Hough-Mode der ganztägigen migrierenden Gezeitenwelle ( $s=1$ , $\sigma=-0.5$ , $n=1$ ) (links) und der halbtägigen migrierenden Gezeitenwelle ( $s=2$ , $\sigma=-1$ , $n=2$ ) (rechts) von Lange (2001) . . . . .	4
3	Normalfall der Walker-Zirkulation am Äquator von Lau und Yang (2002) . . . .	7
4	Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre während La Niña, im Normalfall und während El Niño von Latif (2006) . . . . .	8
5	Einfluss von Kelvin- und Rossbywellen auf ENSO von Kasang (2020) . . . . .	9
6	ENSO Temperatursignal von der linearen Regression von Satellitentemperaturen von 1979-2014 für November und Dezember in den Bildern (a) und (b) und für Januar, Februar und März in den Bildern (c) und (d) aus Domelsen et al. (2019) . . . . .	10
7	Mittel von Dezember-Januar-Februar während La Niña von (a) Temperaturanomalien und (b) Zonalwindanomalien. Gestrichelte Linien zeigen negative Anomalien an und durchgezogene Linien positive Anomalien von Iza et al. (2016)	11
8	Schematischer Einfluss von El Niño auf die Troposphäre und die Stratosphäre aus Domelsen et al. (2019) . . . . .	12
9	Zonal gemittelttes Hintergrundfeld der Temperatur im Dezember, Januar und Februar . . . . .	15
10	Zonal gemittelttes Hintergrundfeld des Zonalwindes im Dezember, Januar und Februar . . . . .	16
11	Mittelwerte der Amplitude der Temperatur der ganztägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña . . . . .	17
12	Wie Abbildung 11 aber für die halbtägige Gezeitenwelle . . . . .	17
13	Wie Abbildung 11 aber für die 8-stündige Gezeitenwelle . . . . .	18
14	Wie Abbildung 11 aber für die 6-stündige Gezeitenwelle . . . . .	18
15	Temperaturanomalien der ganztägigen Gezeitenwelle in 110 km Höhe von WACCM Simulationen während El Niño und La Niña von Pedatella und Liu (2013) .	34
16	Temperaturanomalien der ganztägigen Gezeitenwelle von GAIA Simulationen während El Niño und La Niña von Liu et al. (2017) . . . . .	35

## A Anhang: Zonalwind- und Meridionalwindamplituden der Gezeiten im Winter

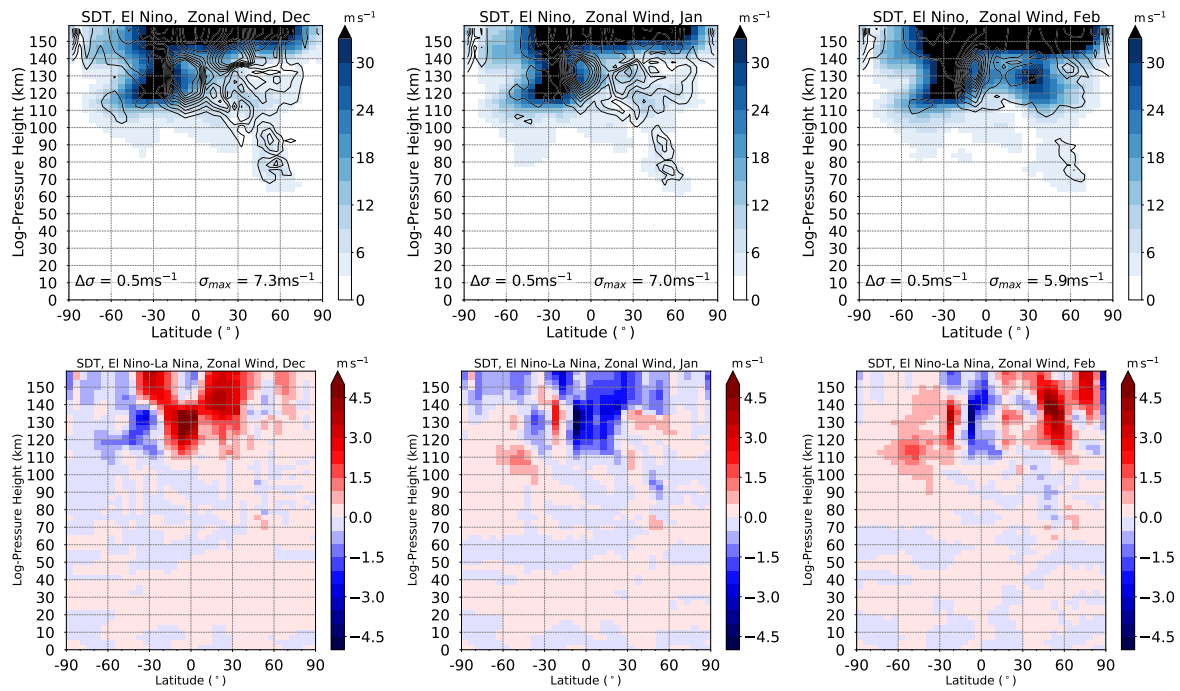
Im Anhang werden noch die Amplituden der Gezeiten des Zonalwindes und Meridionalwindes im Dezember, Januar und Februar während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña gezeigt.

### A.1 Zonalwind

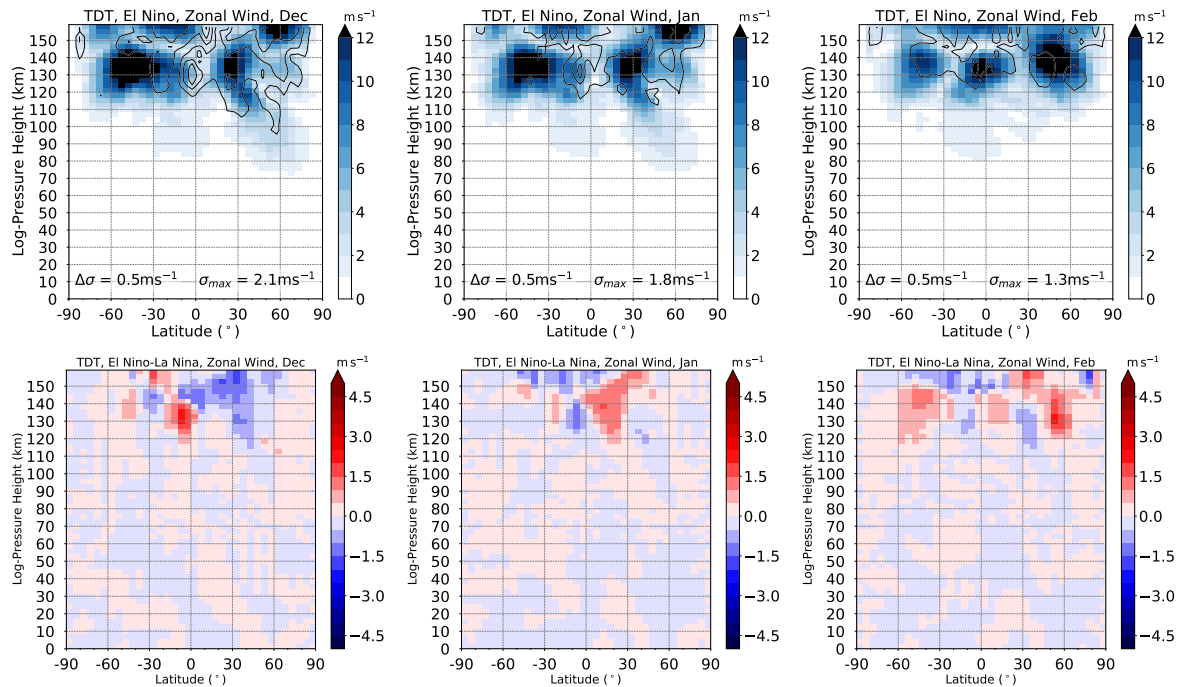


Mittelwerte der Amplitude des Zonalwindes der ganztägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

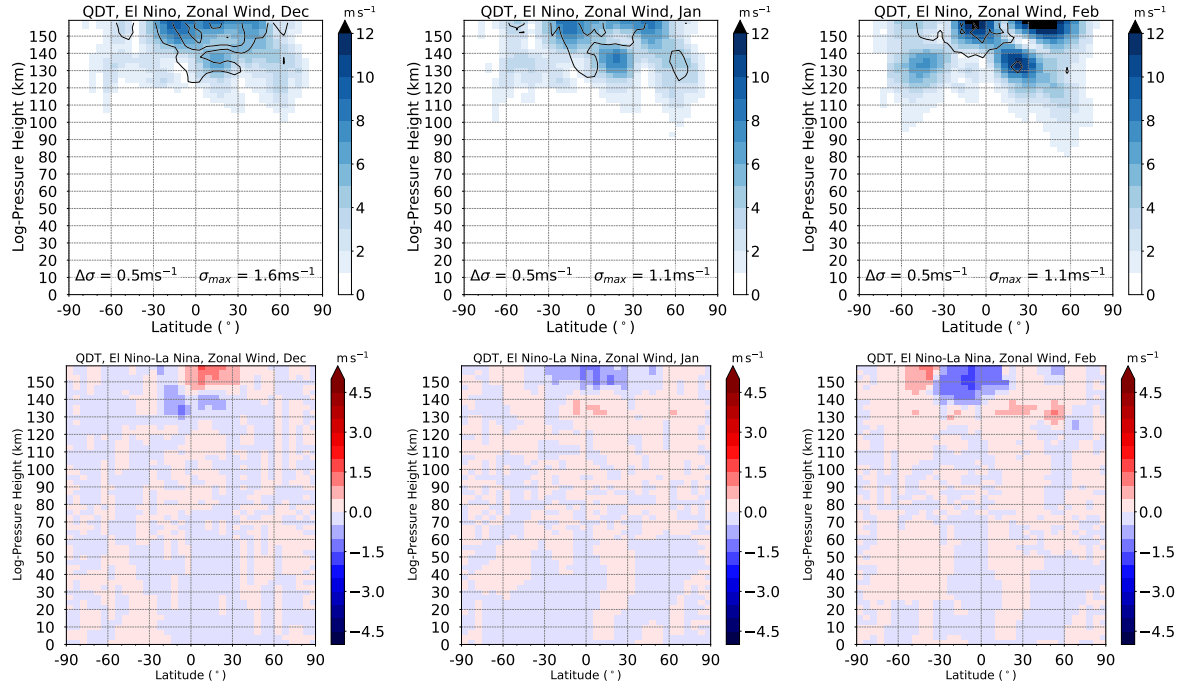




Mittelwerte der Amplitude des Zonalwindes der halbtägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

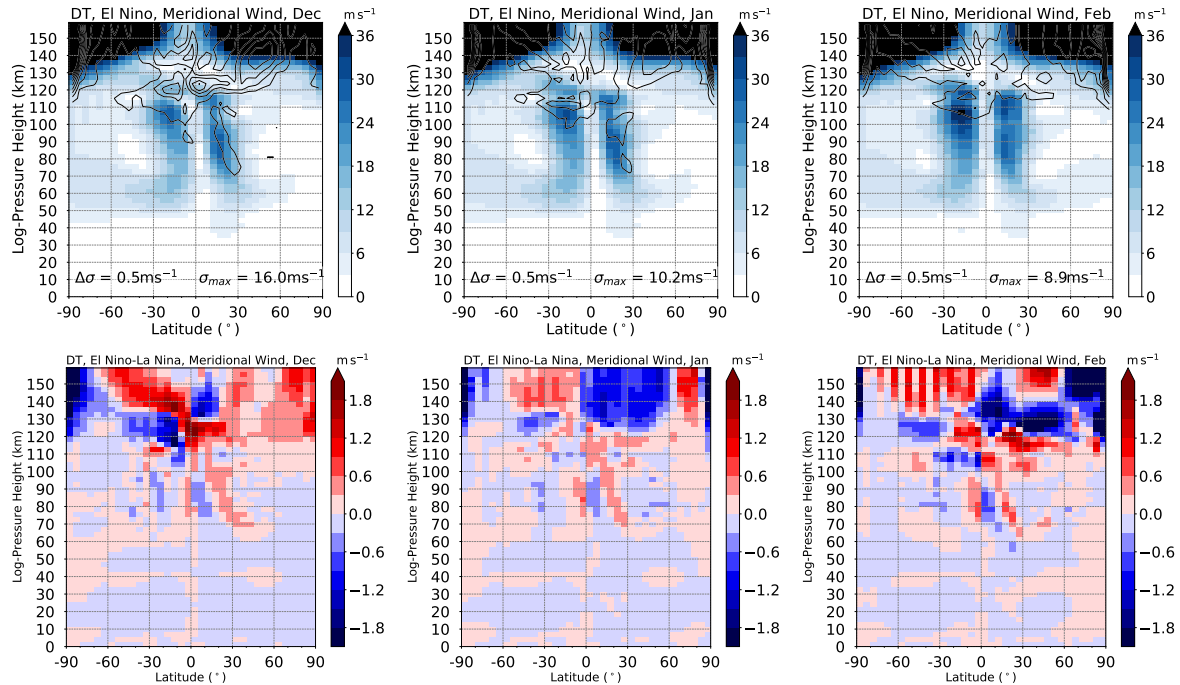


Mittelwerte der Amplitude des Zonalwindes der 8-stündigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

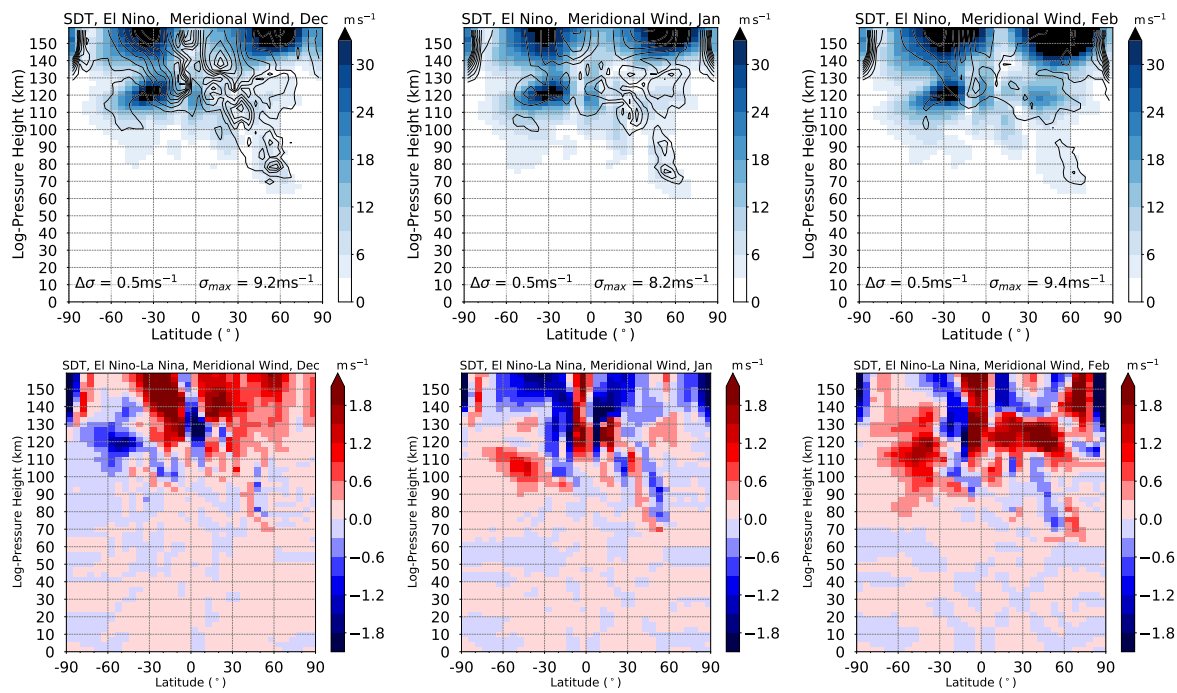


Mittelwerte der Amplitude des Zonalwindes der 6-stündigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

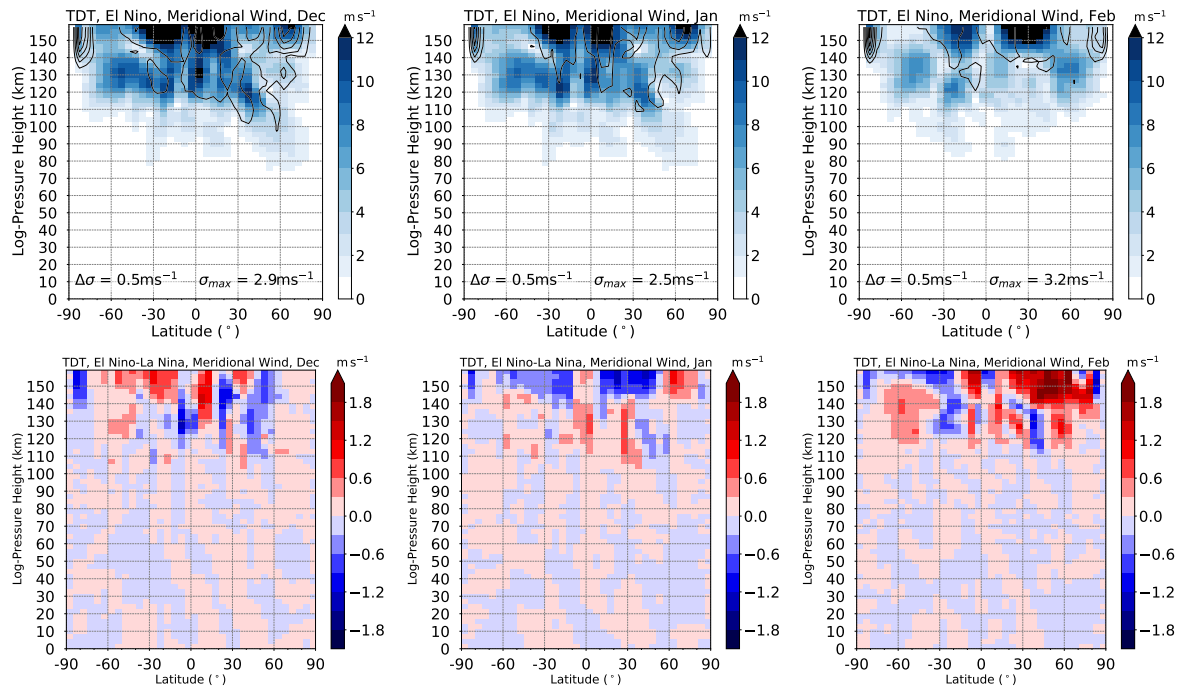
## A.2 Meridionalwind



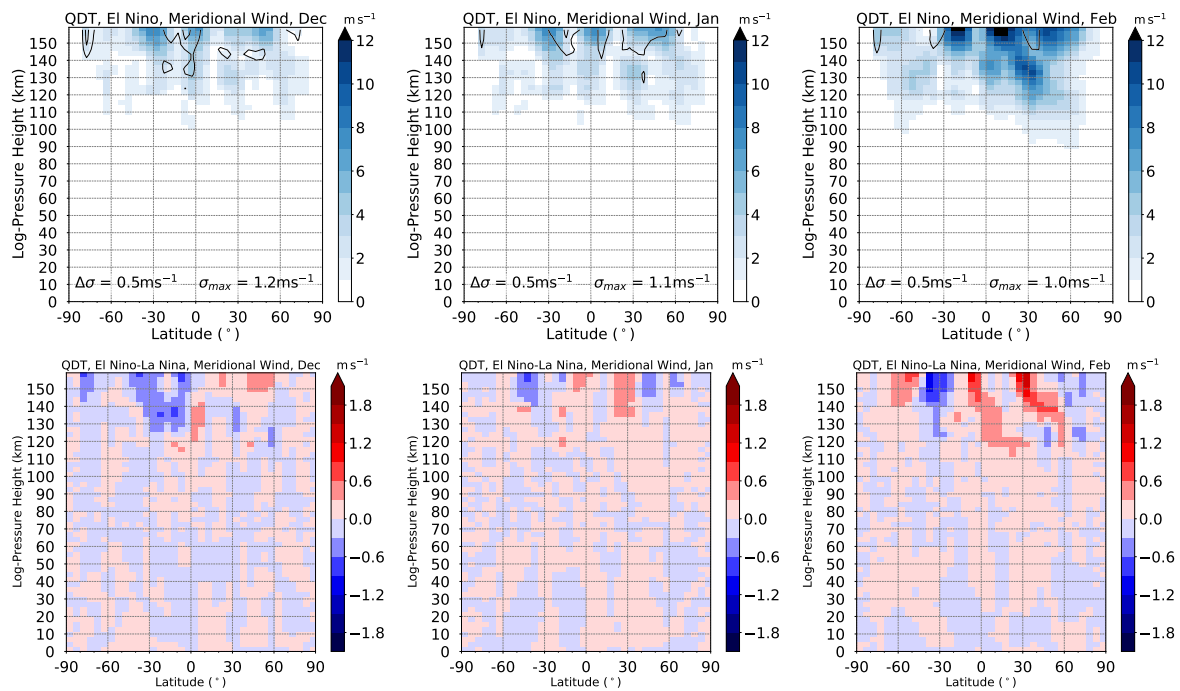
Mittelwerte der Amplitude des Meridionalwindes der gantztägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña



Mittelwerte der Amplitude des Meridionalwindes der halbtägigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña



Mittelwerte der Amplitude des Meridionalwindes der 8-stündigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña



Mittelwerte der Amplitude des Meridionalwindes der 6-stündigen Gezeitenwelle während El Niño und die Differenz zwischen El Niño und La Niña

## 9 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gebührt mein Dank Professor Christoph Jacobi, der meine Arbeit betreut hat. Vielen Dank für die konstruktive Kritik und die hilfreichen Anregungen.

Ich bedanke mich außerdem bei dem European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) für die Bereitstellung der ERA-5 Daten.

Ein besonderer Dank gebührt auch Dr. Aleš Kuchař, Dr. Friederike Lilienthal und Nadja Samtleben für die Bereitstellung und die Hilfe beim Anpassen des Modells MUAM sowie für das zur Verfügung stellen und Bearbeiten der Python-Skripte zum Erstellen der Bilder.

Abschließend möchte ich mich auch noch bei meinen Eltern für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanken.

## 10 Eigenständigkeitserklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Ich versichere, dass diese Arbeit noch nicht zur Erlangung eines Bachelorgrades an anderer Stelle vorgelegen hat.

Melanie Stober