

Kapitel 6

Der Einfluss von Sonnenfleckenzyklus und QBO im Modell

Bisher wurde nur das mittlere Sonnensignal diskutiert. In diesem Kapitel wird nun der (dynamische) Beitrag der tropischen Stratosphäre für die Ausbildung eines Sonnensignales in der Modellatmosphäre betrachtet, um die mit Fragezeichen behaftete Rolle der QBO und der SAO im Mechanismusschaubild (Abb. 2.15) zu klären bzw. zu analysieren. Dafür werden die in Kapitel 5 untersuchten Modellexperimente für Sonnenfleckenmaximum und -minimum-Bedingungen getrennt für die beiden QBO-Phasen diskutiert (kwmaeqbof/kwmieqbof, kwmawqbof/kwmiwqbof; vgl. Tab. 3.3). Wie in Kapitel 2 bereits ausgeführt wurde, gibt es momentan noch keine Modellstudie, welche unter realistischen Vorgaben von UV-Strahlungs- und Ozonänderungen den Einfluss der äquatorialen Windschwingungen untersucht hat. Deshalb erfolgt ein Vergleich mit Beobachtungsstudien sowie mit anderen FUB-CMAM Modellexperimenten, in denen eine QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre (kwqbofmax/kwqbofmin) vorgegeben wurde.

6.1 Das Wintersignal

Das solare Signal unterscheidet sich für die beiden QBO-Phasen sowohl im Winter (Labitzke, 1987; Labitzke und van Loon, 1988) als auch im Sommer (Labitzke, 2003) (vgl. auch Kapitel 2). Während man im Sonnenfleckenminimum im Winter den „Holton und Tan Mechanismus“ beobachten kann (kalte, ungestörte Winter in der QBO-West- und warme, gestörte Winter in der QBO-Ostphase), ist er im Sonnenfleckenmaximum nicht mehr so klar erkennbar. Große Stratosphärenwärmungen treten dann nämlich unter QBO-West-Bedingungen auf. Eine Erweiterung des „Holton und Tan Mechanismus“, welcher sich auf die Definition der QBO in der unteren tropischen Stratosphäre stützt, wurde erst kürzlich von Gray et al. (2001a,b) durch die Hinzunahme der Winde in der oberen Stratosphäre durchgeführt (vgl. Kapitel 2). Diese neue Erkenntnis floss durch die Implementierung von äquatorialen Winden bis in die obere Stratosphäre in die hier vorgestellten Modellexperimente ein und erlaubt daher eine Überprüfung dieses in Beobachtungen und mechanistischen Modellstudien gefundenen Zusammenhanges.

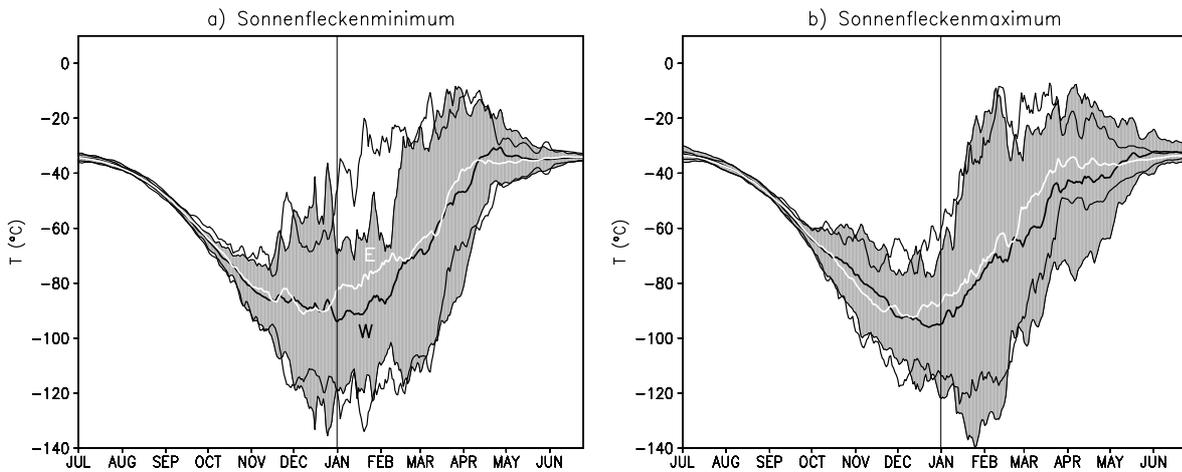


Abbildung 6.1: Langzeit-Tagesmittel der 10-hPa (32 km) Nordpoltemperatur in °C für a) die Sonnenfleckenminimum- und b) die Sonnenfleckenmaximum-Experimente. QBO-West-Experimente: schwarze Linie mit grau schattierter 2σ -Standardabweichung, QBO-Ost-Experimente: weiße Linie mit unausgefüllter 2σ -Standardabweichung. Die vertikale Linie im Januar gibt den Übergang zwischen Früh- und Spätwinter an (Fig. 10 aus Matthes et al., 2004).

6.1.1 Der „Holton und Tan Mechanismus“ im Modell

Anhand des Langzeit-Tagesmittels der 10-hPa Nordpoltemperatur für die vier Experimente erkennt man, dass der „Holton und Tan Mechanismus“ im Modell für die Sonnenfleckenminimum-Experimente von Januar bis März erfüllt ist (Abb. 6.1a), für die Sonnenfleckenmaximum-Experimente jedoch nicht mehr (Abb. 6.1b). Dies bestätigt die aus Beobachtungen gefundenen Zusammenhänge. Besonders deutlich erkennt man dies beim Vergleich der Standardabweichungen, welche ein Maß für die Variabilität der Experimente darstellen. Während die Variabilität im Januar und Februar im Sonnenfleckenminimum für das QBO-West-Experiment geringer als für das QBO-Ost-Experiment ist (das entspricht einem kälteren, ungestörteren Wirbel im QBO-West-Experiment), ist sie im Sonnenfleckenmaximum für das QBO-West-Experiment sogar stärker als für das QBO-Ost-Experiment und spricht für das verstärkte Auftreten von Stratosphärenwärmungen im QBO-West-Experiment. Die Unterschiede in den Experimenten sind zwar nicht statistisch signifikant, lassen aber im Vergleich zu anderen Experimenten mit dem FUB-CMAM eine eindeutige Verbesserung der Simulationsergebnisse erkennen, worauf im weiteren Verlauf ausführlich eingegangen wird. Gut zu erkennen ist in Abb. 6.1 auch das bereits angesprochene „cold pole“ Problem.

Das verstärkte Auftreten von Stratosphärenwärmungen im Sonnenfleckenmaximum-Experiment bei einer QBO-Westphase ist noch einmal in Abb. 6.2 dargestellt. Im QBO-West-Experiment (Abb. 6.2c,d) treten Stratosphärenwärmungen im Sonnenfleckenmaximum, erkennbar an den positiven Temperaturdifferenzen in den hohen Breiten, bereits im Januar in der mittleren Stratosphäre auf und erstrecken sich im Februar bis in die untere Stratosphäre. Dabei stimmt die maximale Temperaturdifferenz von +8 K in der mittleren Stratosphäre im Februar sehr gut mit dem beobachteten Wert von +9 K (Labitzke, 2001) überein. Im QBO-Ost-Experiment hingegen prägen negative Differenzen, welche einen kälteren, ungestörteren Wirbel angeben, das Bild in der mittleren und unteren Stratosphäre im

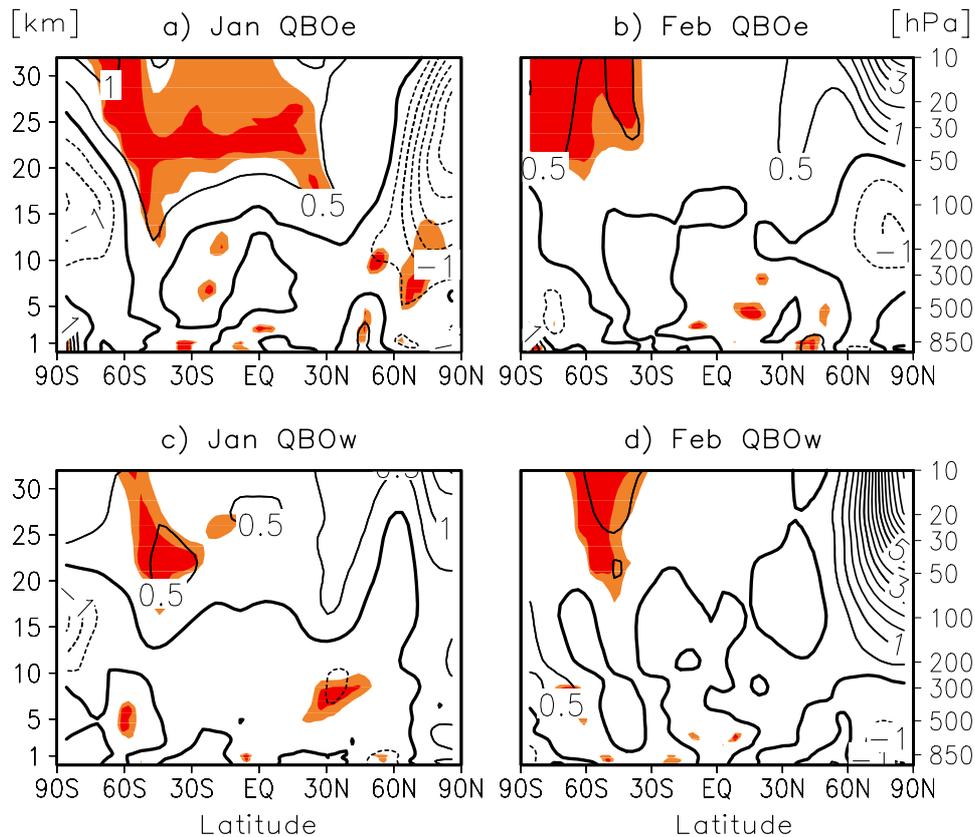


Abbildung 6.2: Temperaturdifferenzen zwischen Sonnenfleckensmaximum- und -minimum-Experiment von 90°S bis 90°N und 1000 bis 10 hPa (0-32 km) für a) den Januar des QBO-Ost-Experimentes, b) den Februar des QBO-Ost-Experimentes, c) den Januar des QBO-West-Experimentes und d) den Februar des QBO-West-Experimentes. Isolinienabstand: 0,5 K, orange (rot) sind zu 95% (99%) statistische signifikante Gebiete dargestellt (Fig. 11 aus Matthes et al., 2004).

Januar und in der unteren Stratosphäre und oberen Troposphäre im Februar. Positive Temperaturdifferenzen treten in der mittleren Stratosphäre im Februar, also einen Monat später als für das QBO-West-Experiment, auf. Das unterschiedliche Auftreten von Stratosphärenerwärmungen in den vier Modellexperimenten ist in Tab. 6.1 noch einmal zusammengestellt. Das Experiment unter Sonnenfleckensmaximum- und QBO-West-Bedingungen ist genau wie das Experiment unter Sonnenfleckensminimum- und QBO-Ost-Bedingungen durch zwei große Stratosphärenerwärmungen und über 30 kleine Erwärmungen gekennzeichnet, während die anderen beiden Experimente deutlich weniger Erwärmungen (etwas über 20) und keine einzige große Erwärmung zeigen. Im Modell treten genau wie in den Beobachtungen sehr viele Stratopausenerwärmungen während des Winters auf, welche sich allerdings nicht nach unten durchsetzen (z. B. Braesicke und Langematz, 2000). Bei der hier gewählten Definition wurden nur die Erwärmungen gezählt, die bis mindestens 5 hPa (~ 37 km) herunterreichten. Natürlich kann man bei einer Länge der Modellexperimente von jeweils 15 Jahren nicht mit hundertprozentiger Sicherheit ausschließen, dass es sich um eine zufällig gute Übereinstimmung zwischen Beobachtungen und Modell im Hinblick auf die auftretenden Erwärmungen handelt. In Abb. 6.2 erkennt man wieder sehr gut das entgegengesetzte Verhalten der stratosphärischen Signale in hohen und niedrigen geographischen Breiten, welches dem Konzept der NAM

Sonnenflecken-/QBO-Phase	Major Warmings	Minor Warmings
Maximum/QBO-West	2	33
Minimum/QBO-Ost	2	34
Maximum/QBO-Ost	–	23
Minimum/QBO-West	–	22

Tabelle 6.1: Anzahl der in den Experimenten mit realistischem äquatoriales Windprofil auftretenden großen (Major) und kleinen (Minor) Stratosphärenenerwärmungen. Kriterium für ein Major Warming: positiver Temperaturgradient zwischen dem Nordpol (NP) und mittleren Breiten ($\Delta T(NP - 60^\circ N) > 0$), Ostwind in $60^\circ N$ und 10 hPa oder darunter, Zusammenbruch der normalen Winterzirkulation; Minor Warming: positiver Temperaturgradient und Abschwächung des Westwindes in $60^\circ N$ in irgendeiner stratosphärischen Schicht.

entspricht. Während man in der Polarregion im Januar des QBO-Ost-Experimentes negative Anomalien (in der unteren Stratosphäre zum Teil statistisch signifikant) erhält, findet man statistisch signifikante positive Anomalien von den mittleren Breiten der Nordhemisphäre bis in die Südhemisphäre. Für das QBO-West-Experiment erhält man ein nahezu entgegengesetztes Muster mit positiven Anomalien in polaren Breiten und schwach positiven Anomalien (relatives Temperaturminimum) in den Tropen, welche sehr viel weniger signifikant sind. Dieses Verhalten des Modells ist zwar weniger stark ausgeprägt als in Beobachtungen, geht aber in die richtige Richtung. Mögliche Gründe für das schwache Signal in niedrigen Breiten werden in der Zusammenfassung (Kapitel 8) diskutiert. Bemerkenswert ist auch die Ausdehnung der stratosphärischen Anomalien bis in die Troposphäre hinein (vgl. Kapitel 7). Die tropischen und subtropischen positiven Temperaturanomalien erstrecken sich von November bis Februar für beide Experimente von der Stratosphäre bis in die Troposphäre (vgl. Abb. 6.3 und Abb. 6.2). Anhand der Signifikanzen für das QBO-Ost-Experiment erkennt man eine Verlagerung dieser Gebiete von der mittleren Stratosphäre im November bis in die untere Stratosphäre im Januar. Im Februar verschwinden diese Signifikanzen wieder. Für das QBO-West-Experiment sind die statistisch signifikanten Gebiete generell kleiner und sowohl die Differenzen in den Tropen und Subtropen als auch die in hohen Breiten reichen nicht so weit in die Troposphäre hinein wie für das QBO-Ost-Experiment. Der stärkste Unterschied in den troposphärischen Anomalien zwischen dem Ost- und dem West-Experiment tritt im Dezember und Januar auf (vgl. Kapitel 7).

Um die gezeigten unterschiedlichen Signale in der unteren und mittleren Stratosphäre für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment zu erklären, wird im Folgenden die vertikale Struktur der Signale für beide Experimente untersucht.

6.1.2 Nordhemisphäre

Die nordhemisphärischen Temperatur- und Winddifferenzen für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment zeigen die Entwicklung für die beiden Experimente (Abb. 6.4).

In beiden Experimenten tritt im Oktober ein Westwind-Initialsignal in einer Breite von $20^\circ N$ und einer Höhe von 55 km auf, welches für das QBO-Ost-Experiment stärker und statistisch signifikant ist (Abb. 6.4b,d). Dieses Westwind-signal lässt sich über die thermische Windrelation (Gl. 3.19) als Folge des direkten Temperatursignales in den Tropen erklären (vgl. auch Abschnitt 5.2.2). Die unterschiedliche Stärke des tropischen Temperatursignales im QBO-Ost- und West-Experiment erklärt zumindest teilweise die unterschiedliche Stärke des Westwind-Initialsignales im Oktober (vgl. Abschnitt 6.3.3). Im November verstärkt sich das tropische

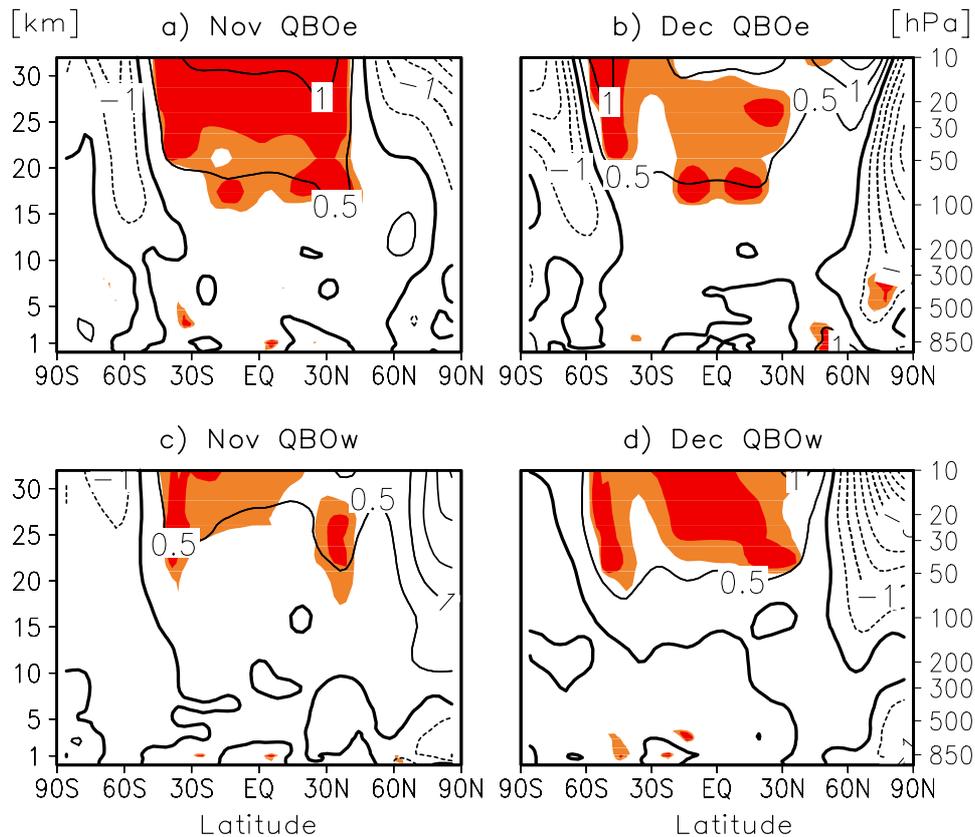


Abbildung 6.3: Wie Abb. 6.2 nur für den November und Dezember.

Temperatursignal ebenso wie die Westwinddifferenzen in den beiden Experimenten. Im QBO-Ost-Experiment findet man im November passend zu dem Quadrupol-Muster in der Temperatur, eine an der äquatorwärtigen Flanke des Signales statistisch signifikante Westwinddifferenz von 14 m/s (Abb. 6.4b). Diese beginnt ab November durch die bereits für das mittlere Sonnensignal beschriebene positive Wechselwirkung zwischen Wellen und Grundströmung polwärts und abwärts zu wandern (vgl. Abschnitt 5.2.3 und 5.2.3). Für das QBO-West-Experiment ist diese positive Wechselwirkung ebenfalls erkennbar, verläuft aber sowohl räumlich als auch zeitlich etwas anders (vgl. Abschnitt 6.3.3). Erst im November des QBO-West-Experimentes verstärkt sich das tropische Temperatursignal und die Westwindinitialdifferenz (Abb. 6.4c,d), die im Dezember mit 14 m/s die gleiche Größenordnung wie die Winddifferenz im November des QBO-Ost-Experimentes erreicht (Abb. 6.4b). Die Größenordnung der Winddifferenzen passt mit Ausnahme der subtropischen Signale besser zu den Beobachtungen (Abb. 2.10) als vorangegangene Studien mit dem FUB-CMAM (Labitzke und Matthes, 2003) und anderen Modellen (Matthes et al., 2003). Für die beiden QBO-Phasen ist insbesondere die unterschiedliche Breitenlage der Differenzen bemerkenswert. Die stärksten Winddifferenzen im QBO-West-Experiment treten meistens in höheren Breiten auf und reichen nicht so weit in die mittleren und subtropischen Breiten (z. B. im Dezember und Februar bis Mai) wie die stärksten Differenzen im QBO-Ost-Experiment. Dies hängt unter anderem mit der unterschiedlichen Lage der Temperaturdifferenzen zusammen, die beispielsweise für das QBO-Ost-Experiment im November in tropischen und subtropischen Breiten maximal sind (Abb. 6.4a), während das Maximum in dem QBO-West-Experiment zu mittleren Breiten verschoben ist (Abb. 6.4c). Das Maximum der Winddifferenzen ist dementsprechend für das QBO-West-Experiment zu hohen Breiten verschoben (Abb. 6.4d). Die unterschiedliche Stärke der Westwind-Initialsignale, die

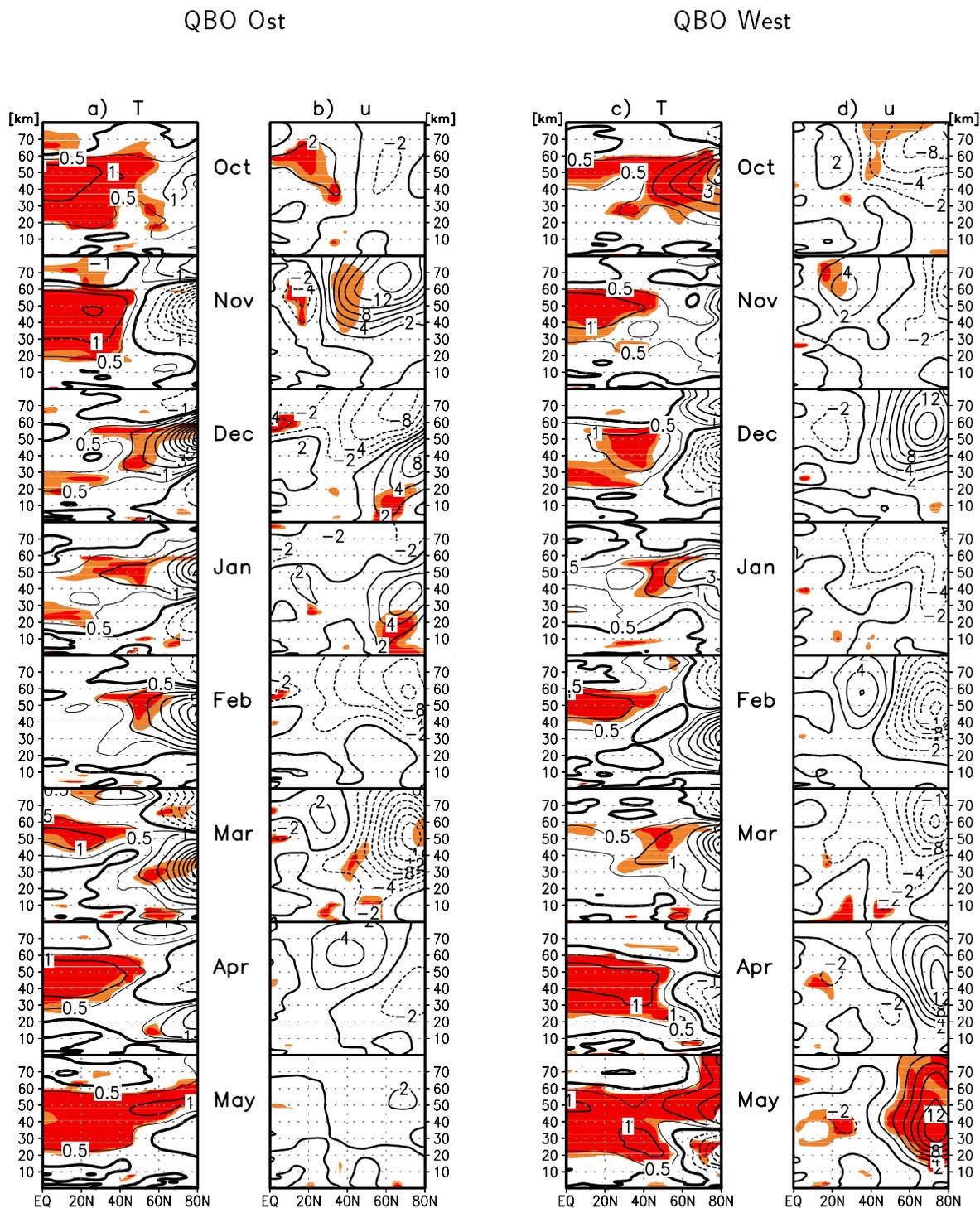


Abbildung 6.4: Wie Abb. 5.6 für a) die Temperaturdifferenzen des QBO-Ost-Experimentes, b) die Differenzen des zonal gemittelten zonalen Windes des QBO-Ost-Experimentes, c) die Temperaturdifferenzen des QBO-West-Experimentes und c) die Differenzen des zonal gemittelten zonalen Windes des QBO-West-Experimentes, statistisch signifikante Gebiete sind farbig gekennzeichnet (Abb. 6.4b,d entspricht Fig. 12 aus Matthes et al., 2004).

unterschiedliche Lage der Winddifferenzen und die unterschiedliche Entwicklung in den beiden Experimenten werden in Abschnitt 6.3.3 ausführlich diskutiert.

Abgesehen von der unterschiedlichen Breitenlage der Differenzen für die beiden Experimente ist die Entwicklung der zonalen Windanomalien mit einem Westwind-Initialsignal im Frühwinter und einer sich später im Winter entwickelnden Ostwindanomalie für beide QBO-Phasen sehr ähnlich. Nur das zeitliche Auftreten dieser „typischen“ Windanomalien unterscheidet sich. Der größte Unterschied zwischen den beiden QBO-Phasen tritt im Januar auf: während im Sonnenfleckenmaximum ein stärkerer PNJ für das QBO-Ost-Experiment in der gesamten Stratosphäre existiert (Abb. 6.4b), ist der PNJ für das QBO-West-Experiment bereits abgeschwächt (Abb. 6.4d) und deutet das Auftreten von Stratosphärenwärmungen an (vgl. auch Abb. 6.2). Die Entwicklung für das QBO-Ost-Experiment verläuft sehr ähnlich zum mittleren Sonnensignal in Abb. 5.6b, während die Entwicklung für das QBO-West-Experiment von Dezember an schneller verläuft und zu einem früheren Auftreten der negativen Windanomalien und damit der Stratosphärenwärmungen führt. Interessant ist auch das Anhalten der PNJ-Modulation in den April hinein, welches schon für das mittlere Sonnensignal angesprochen wurde (Kapitel 5) sowie das Auftreten signifikanter Winddifferenzen in der Troposphäre im Dezember und Januar des QBO-Ost-Experimentes (siehe Kapitel 7). Die signifikante Westwindanomalie im Mai des QBO-West-Experimentes könnte mit einer späteren Umstellung zur Sommerzirkulation im Sonnenfleckenmaximum-Experiment zusammenhängen. Generell sind die Signale in den hohen Breiten der Winterhemisphäre aufgrund der starken Jahr-zu-Jahr Variabilität im Modell statistisch nicht signifikant. Für das QBO-Ost-Experiment sind die Winddifferenzen etwas signifikanter als für das QBO-West-Experiment (Abb. 6.4b,d).

Unterschiede zwischen den Temperaturdifferenzen des QBO-Ost- und West-Experimentes treten nicht nur in den hohen Breiten der Stratosphäre und Mesosphäre, sondern auch in den subtropischen und mittleren Breiten der unteren und mittleren Stratosphäre auf. Dort befinden sich im QBO-Ost-Experiment von Oktober bis Januar signifikante positive Temperaturdifferenzen von mehr als 0,5 K (Abb. 6.4a), während man im QBO-West-Experiment vergleichbare Temperaturdifferenzen nur im November und Dezember findet (Abb. 6.4c). Ob die beschriebenen Temperaturänderungen für das QBO-Ost-Experiment wie für das mittlere Temperatursignal beschrieben, zu Änderungen der MRZ (Abschnitt 5.2.3) passen, wird in Abschnitt 6.1.4 untersucht. Im Gegensatz zu Beobachtungen (Abb. 2.10) findet man die positiven Temperatursignale in der tropischen unteren Stratosphäre im Modell nicht mehr im Februar, März und April (Abb. 6.4a).

Die sehr ähnliche Entwicklung der Zirkulationsanomalien für die beiden QBO-Phasen deutet darauf hin, dass die Phase der äquatorialen QBO lediglich das zeitliche Auftreten/die zeitliche Entwicklung des Sonnensignales in der Atmosphäre bestimmt. Das unterschiedliche zeitliche Auftreten der prinzipiell ähnlichen Muster ist auch in Beobachtungen erkennbar (vgl. Abb. 2.10) (Kodera, persönliche Mitteilung, 2002). Das Modellsignal ist im Vergleich dazu allerdings zeitlich wieder um etwa einen Monat verschoben. Im Modell erhält man den stärksten Unterschied zwischen den beiden QBO-Phasen im Januar, während er in Beobachtungen erst im Februar auftritt. Außerdem fällt beim Vergleich mit Beobachtungen wieder die geringere Variabilität und damit die geringere Größenordnung der Differenzen besonders in der subtropischen oberen Stratosphäre auf (vgl. Abschnitt 6.3.4).

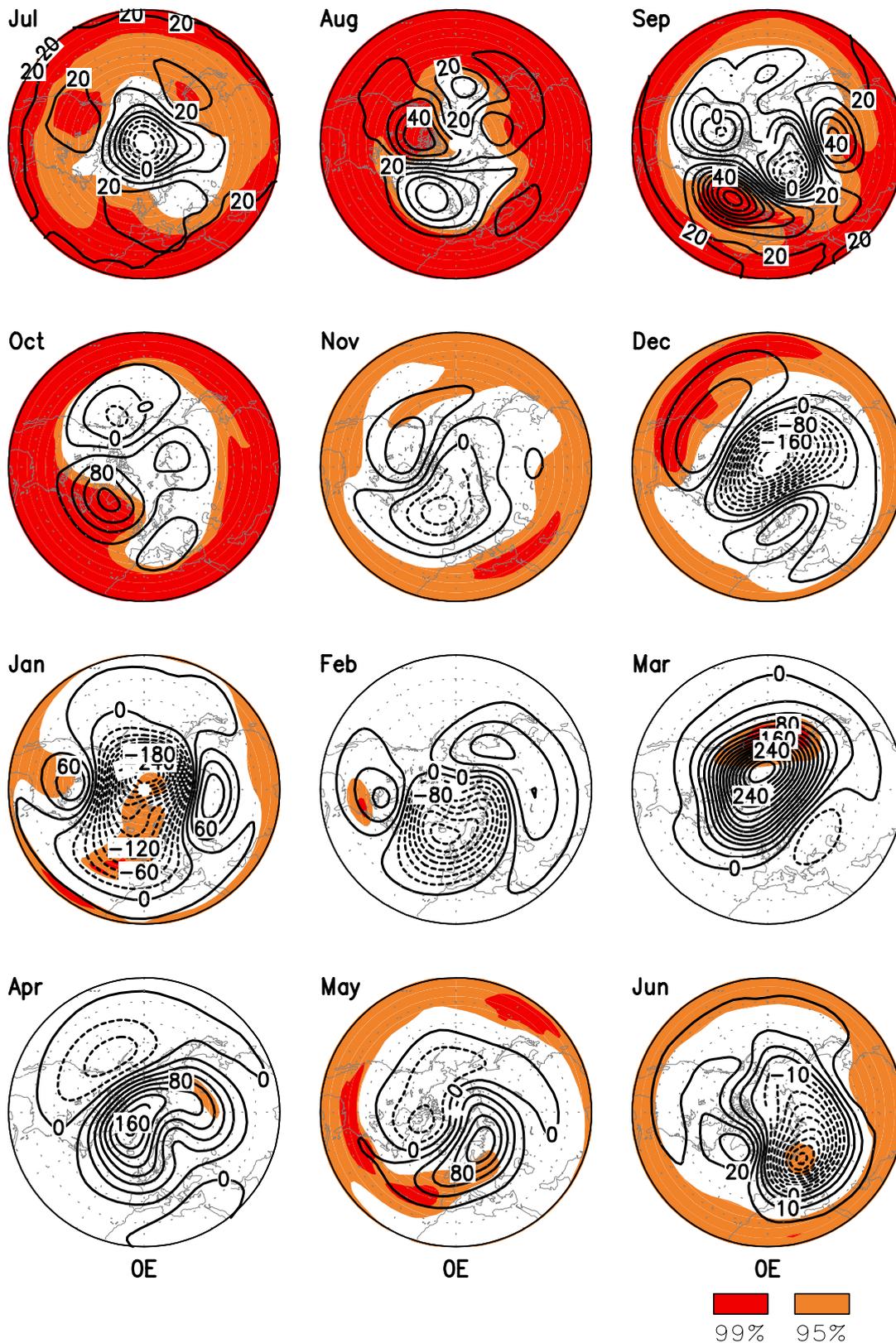


Abbildung 6.5: Polarstereographische Projektion der Differenzen der 30-hPa geopotentiellen Höhe (24 km) zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum für das Experiment mit QBO-Ostphase auf der Nordhemisphäre von 20° bis 90°N für Juli bis Juni, Isolinienabstand: Juni-September: 5 gpm, sonst: 20 gpm. Bild für den Januar: Fig. 13a aus Matthes et al. (2004).

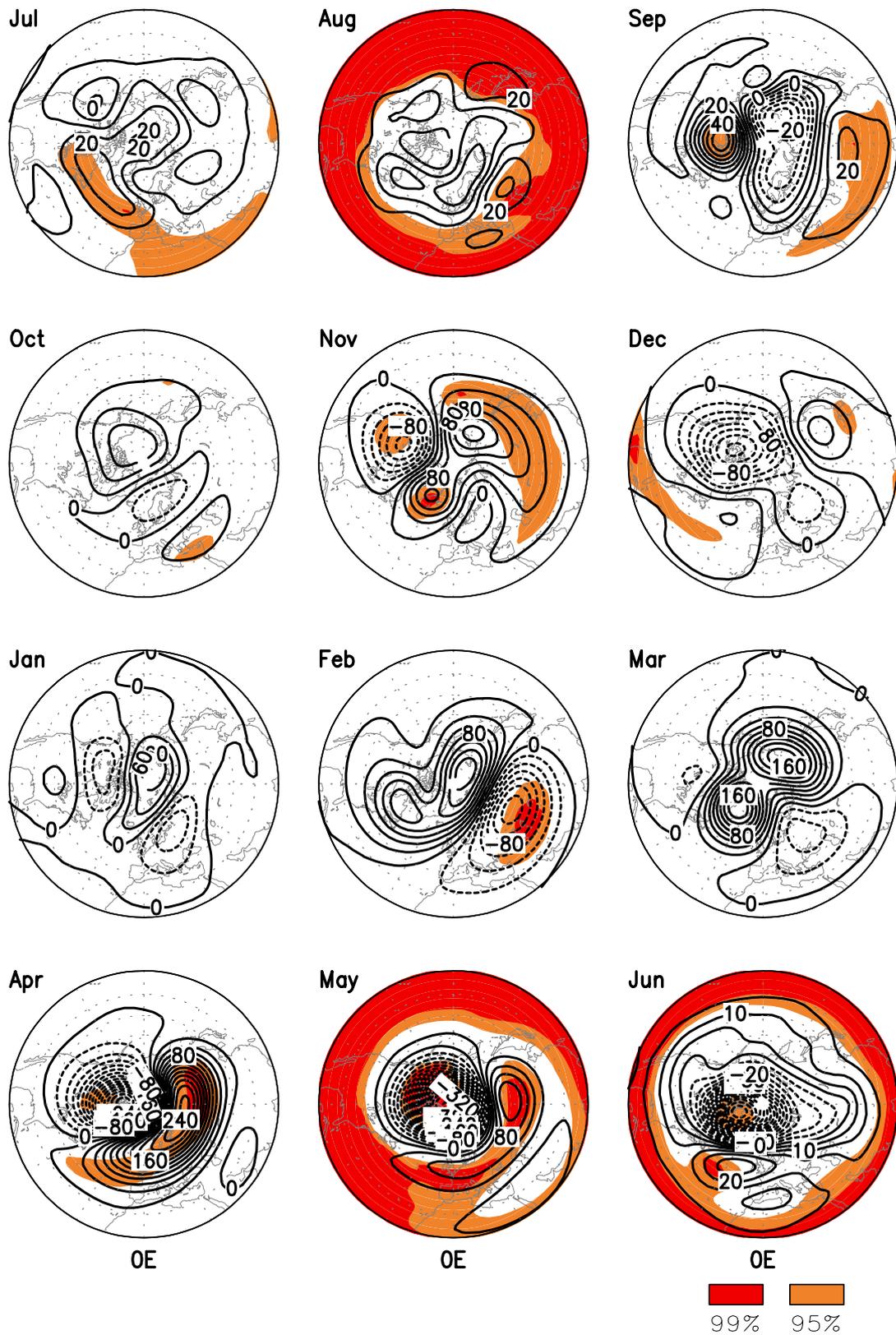


Abbildung 6.6: Wie Abb. 6.5 nur für das Experiment mit einer QBO-Westphase, Bild für den Januar: Fig. 13b aus Matthes et al. (2004).

Wenn die QBO wirklich nur das zeitliche Auftreten des Sonnensignales bestimmt - dafür sprechen sowohl die Modellergebnisse als auch Beobachtungen - könnten die beobachteten Signale bei bestimmten QBO- und Sonnenphasen erklärt werden und geben damit einen weiteren Hinweis auf die gegenseitige Wechselwirkung/Beeinflussung von Sonnen- und QBO-Signalen in der Atmosphäre.

Geopotentielle Höhe

Wie eben gezeigt wurde, treten im Januar die größten Unterschiede des PNJ zwischen dem QBO-Ost- und West-Experiment in der Stratosphäre auf (Abb. 6.4b,d). Dort erwartet man deswegen auch die stärksten Unterschiede in der Ausbildung des Polarwirbels, die für die untere Stratosphäre in Abb. 6.5 und Abb. 6.6 gezeigt sind. Im QBO-Ost-Experiment treten im Sonnenfleckenmaximum im Januar signifikant geringere Höhen (-270 gpm) in den hohen Breiten (stärkerer Polarwirbel) sowie höhere geopotentielle Höhen in den mittleren Breiten (+60/90 gpm) auf (Abb. 6.5). Im Vergleich zu früheren Modellstudien hat sich die Größenordnung der Anomalien deutlich verstärkt (vgl. Abb. 4.2). Genau wie für das mittlere Sonnensignal in Abb. 5.7, ähneln die Höhendifferenzen der positiven Phase des NAM. Für das QBO-West-Experiment ist das Signal im Januar genau umgekehrt, aber statistisch nicht signifikant (Abb. 6.6). Im Sonnenfleckenmaximum ist der Polarwirbel schwächer (+90 gpm), d.h. es treten öfter Störungen durch Stratosphärenwärmungen auf, und in niedrigeren Breiten findet man geringere geopotentielle Höhen (-30 gpm). Dieses Signal entspricht der negativen Phase des NAM. Im Vergleich zu Beobachtungen stimmt zwar die Umkehr der Phase des NAM für das QBO-Ost- und West-Experiment im Modell, aber die Größenordnung der Differenzen ist immer noch zu gering. Während man im Februar im Modell Höhendifferenzen von +150 gpm für das QBO West- und -140 gpm für das QBO-Ost-Experiment erhält, erreichen die beobachteten Differenzen Werte von +720 gpm für QBO-West- und -400 gpm für QBO-Ost-Bedingungen (vgl. Abb. 2.6). Die Differenzen im Mai des QBO-West-Experimentes stützen die Annahme, dass der Zeitpunkt der Frühjahrs-umstellung im Sonnenfleckenmaximum- und -minimum-Experiment sehr unterschiedlich ist. Außerdem erkennt man wieder, dass sich die stärksten Differenzen in den hohen Breiten befinden und die Variabilität und damit die Differenzen in niedrigeren Breiten sehr viel geringer als in Beobachtungen sind.

6.1.3 Südhemisphäre

Auch auf der Südhemisphäre erkennt man die Ähnlichkeit des Signales im QBO-Ost-Experiment (Abb. 6.7a) mit dem mittleren Sonnensignal (Abb. 5.6a). Das Signal ist bis September stationär, dann fängt es langsam an, polwärts und abwärts zu wandern, wieder tritt die in Kapitel 5 bereits diskutierte starke Zeitverschiebung im Vergleich zu Beobachtungen auf, die sich mit dem starken südhemisphärischen PNJ erklären lässt. Für das QBO-West-Experiment ist das Signal auf der Südhemisphäre sehr viel schwächer als für das QBO-Ost-Experiment und eine Wanderung des Signales ist wenn überhaupt von November bis Januar zu erkennen (Abb. 6.7b). Abgesehen von der zeitlichen Verschiebung des Signales im Modell passen die simulierten Differenzen qualitativ zu den Beobachtungen (nicht gezeigt): das Signal für die QBO-Ostphase ist sehr viel stärker ausgeprägt, es findet eine deutliche Wanderung der Winddifferenzen statt, während das Signal für die Westphase schwächer ist und kaum eine Wanderung auszumachen ist. Auch auf der Südhemisphäre ist die fehlende Variabilität in subtropischen Breiten im Modell erkennbar.

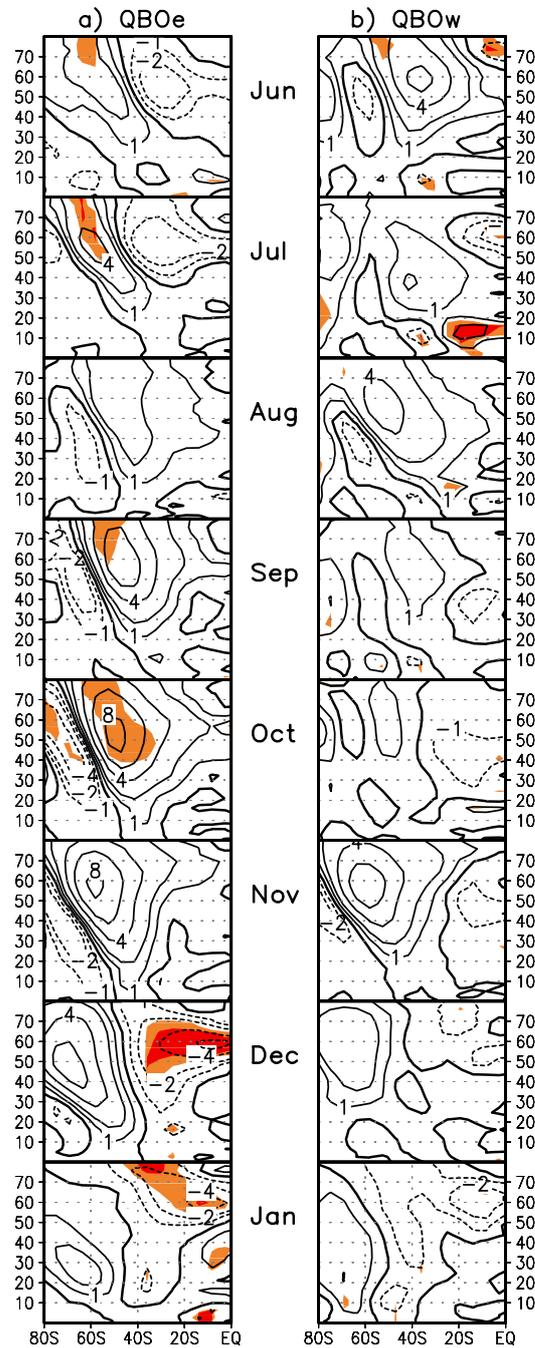


Abbildung 6.7: a) Differenz des zonal gemittelten zonalen Windes für die Südhemisphäre des QBO-Ost-Experimentes, b) wie a) für das QBO-West-Experiment, der Isolinienabstand beträgt 2 m/s, die ± 1 m/s Isolinien sind zusätzlich eingezeichnet, statistisch signifikante Gebiete sind farbig gekennzeichnet.

6.1.4 Die Verbindung zur tropischen unteren Stratosphäre

Im Folgenden soll untersucht werden, ob die tropischen und subtropischen Temperaturanomalien in der unteren und mittleren Stratosphäre des QBO-Ost-Experimentes (vgl. Abb. 6.4a) im Zusammenhang mit Zirkulationsänderungen in den hohen Breiten stehen. Aus Beobachtungen ist bekannt, dass der extratropische Wellenantrieb in der unteren und mittleren Stratosphäre die zonal gemittelte Temperatur in der tropischen unteren Stratosphäre bestimmt. Dies stimmt sowohl für einen Zeitraum von 10-40 Tagen als auch auf der Zeitskala von Jahreszeiten (Randel et al., 2002a). Hood (2003) und Hood und Soukharev (2003) vermuten, dass dieser Zusammenhang auch auf der dekadischen Zeitskala existiert und erklären quasi-dekadische Temperaturvariationen in der tropischen unteren Stratosphäre mit dekadischen Variationen des extratropischen Wellenantriebes. Wie für das mittlere Sonnensignal gezeigt (Abschnitt 5.2.3), unterscheidet sich der extratropische Wellenantrieb auch für das QBO-Ost-Experiment in den beiden hier simulierten Phasen des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Zu zeigen bleibt allerdings, ob dies auch einen Einfluss auf die tropische Temperatur hat.

Zur Überprüfung des in Beobachtungen gefundenen Zusammenhanges ist in Abb. 6.8 die Korrelation zwischen den Absolutfeldern des extratropischen Wellenantriebes im Dezember (als Maß hierfür dient die Vertikalkomponente des EP-Vektors in 60°N und 10 hPa (32 km)) und der zonal gemittelten Temperatur im Januar für das QBO-Ost-Sonnenfleckenminimum-Experiment dargestellt. Der extratropische Wellenantrieb und die Temperatur sind in hohen Breiten in der Stratosphäre positiv korreliert (mit einem Maximum in 10 hPa/30 km), während man in den Tropen und Subtropen eine Antikorrelation in den entsprechenden Höhen findet. Das Muster der stratosphärischen Korrelationen bedeutet, dass man bei einem geringeren extratropischen Wellenantrieb geringere Temperaturen am Winterpol und höhere Temperaturen in den Tropen und Subtropen bekommt. Diese Temperaturänderungen lassen sich mit einer Abschwächung

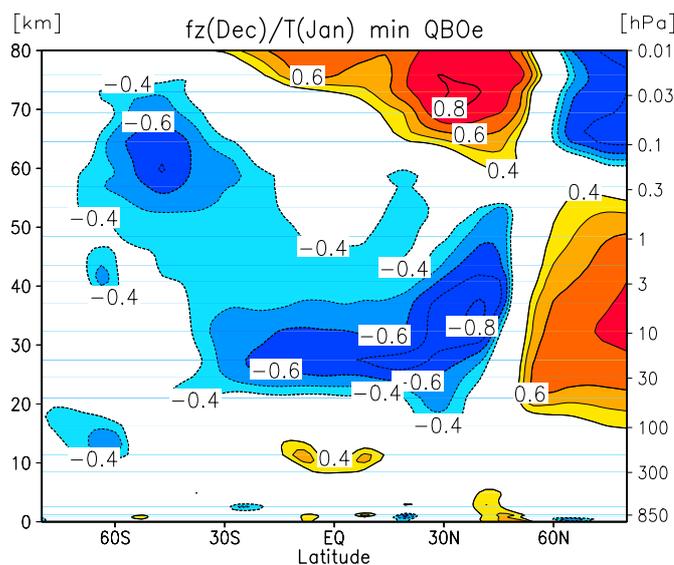


Abbildung 6.8: Korrelationen zwischen dem extratropischen Wellenantrieb in 60°N und 10 hPa (32 km) im Dezember (als Maß hierfür dient die Vertikalkomponente des EP-Vektors) und der zonal gemittelten Temperatur im Januar von 80°S bis 80°N für das Sonnenfleckenminimum-QBO-Ost-Experiment, dargestellt sind nur Korrelationen größer als 0,4, wobei positive Korrelationen in Rot- und negative in Blautönen dargestellt sind, Isolinienabstand: 0,1.

der wellengetriebenen MRZ erklären: in hohen Breiten führt diese zu einer relativen Aufstiegsbewegung, die mit adiabatischer Abkühlung verbunden ist, und in den Tropen zu einer relativen Absinkbewegung, die mit einer Erwärmung verbunden ist. In der Mesosphäre findet man zur Stratosphäre entgegengesetzte Signale, wodurch sich ein Quadrupol-Muster ergibt. Interessant sind auch die relativ hohen Korrelationen in der Mesosphäre der Südhemisphäre ($45^{\circ}\text{S}/60\text{ km}$), die auf einen interhemisphärischen Einfluss und damit auf eine Modulation des mesosphärischen Astes der MRZ hindeuten.

Die Korrelationen zeigen, dass der extratropische Wellenantrieb auch im Modell einen Einfluss auf die Temperaturen in der tropischen und subtropischen Stratosphäre hat. Dieser Zusammenhang ist sowohl für die in Abb. 6.8 gezeigte Dezember-Januar Korrelation als auch für die Januar-Januar Korrelation vorhanden, im Februar verschwindet dieser Zusammenhang (nicht gezeigt). Für das QBO Ost-Sonnenfleckenmaximum-Experiment sind diese Korrelationsmuster auch vorhanden (nicht gezeigt).

Dieser für die Absolutfelder gezeigte Zusammenhang existiert auch für die Differenzfelder (Abb. 6.9) und bedeutet, dass Änderungen des extratropischen Wellenantriebes zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum auch anteilig Änderungen der tropischen und subtropischen Temperaturen erklären. Für eine vollständige Erklärung der subtropischen Temperaturdifferenzen zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum durch Änderungen des extratropischen Wellenantriebes müssten die Korrelationen genau eins sein. In Abb. 6.9 ist außerdem eine zeitliche Entwicklung der Korrelationen dargestellt, die sehr gut zu den in Abb. 6.4a gezeigten Temperaturanomalien passt. Während die Abschwächung der MRZ im Frühwinter (Dez-Dez) in der oberen tropischen und subtropischen Stratosphäre stattfindet (hier nicht explizit gezeigt), wandert dieser Einfluss mit der Zeit in die untere Stratosphäre (Dez-Jan) und ist dann wieder in der mittleren Stratosphäre (Jan-Jan) zu finden. Die stärksten Korrelationen treten für die Kombination Dezember-Januar auf, dort wo in Abb. 6.4a die stärksten Temperaturdifferenzen auftreten. Auch das Quadrupol-Muster der Anomalien passt sehr gut zu dem Quadrupol-Muster der Temperaturdifferenzen und der im Gegensatz zur Stratosphäre stattfindenden Verstärkung der MRZ in den hohen Breiten der mesosphärischen Nordhemisphäre (nicht explizit gezeigt). In den mittleren bis hohen Breiten der mesosphärischen Südhemisphäre deuten die hohen Korrelationen wieder auf einen interhemisphärischen Einfluss der Änderungen in den hohen Breiten der Winterhemisphäre hin.

Der aus Beobachtungen vermutete Zusammenhang zwischen Änderungen der extratropischen Wellenaktivität mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus und dekadischen Temperatursignalen in der tropischen unteren Stratosphäre kann mit dem Modell für die Monate mit einem tropischen Temperatursignal (Dezember und Januar, vgl. Abb. 6.4a) bestätigt werden.

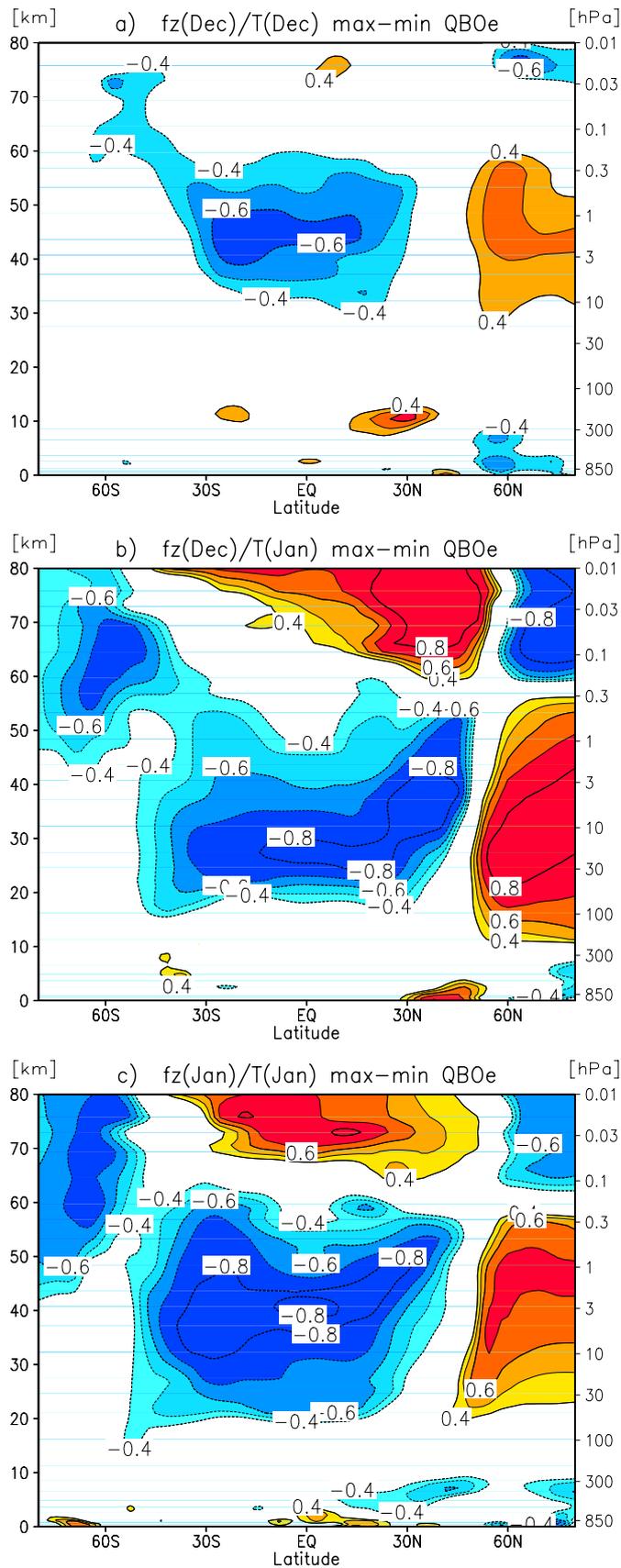


Abbildung 6.9: Wie Abb. 6.8 aber für die Differenzen zwischen dem Sonnenfleckenmaximum und -minimum QBO-Ost-Experiment und a) Dezember-Dezember, b) Dezember-Januar, c) Januar-Januar.

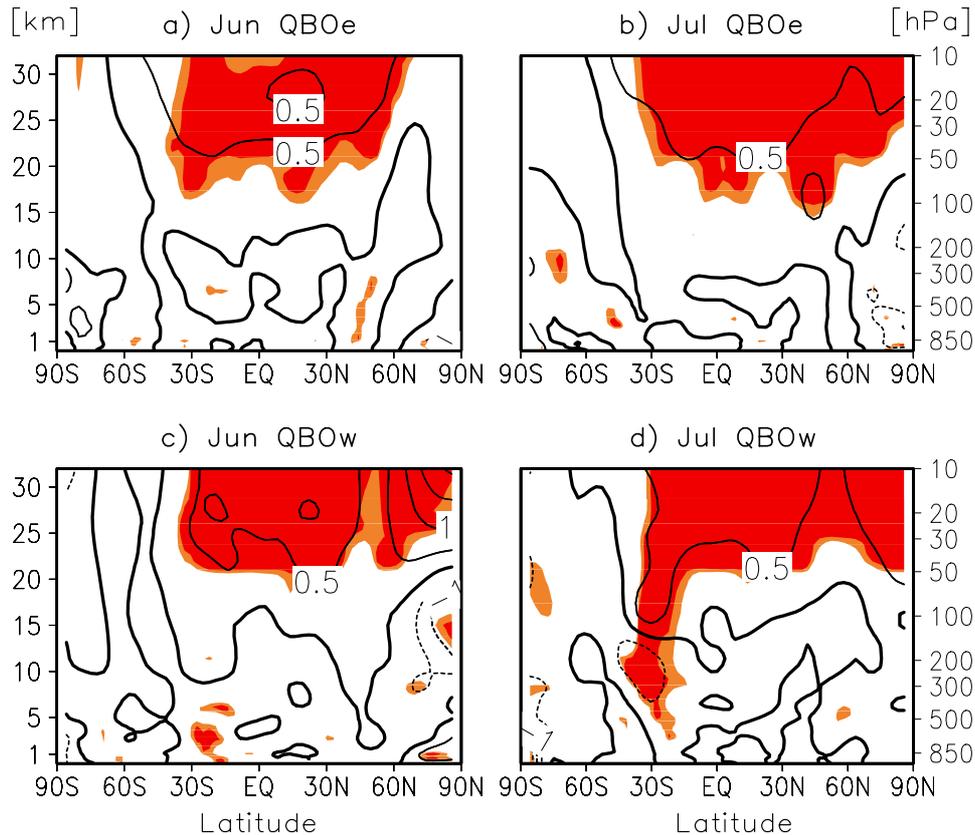


Abbildung 6.10: Temperaturdifferenz zwischen Sonnenfleckennmaximum und -minimum-Experiment von 90°S bis 90°N und 1000 bis 10 hPa für a) den Juni des QBO-Ost-Experimentes, b) den Juli des QBO-Ost-Experimentes, c) den Juni des QBO-West-Experimentes, und d) den Juli des QBO-West-Experimentes; Isolinienabstand: 0,5 K, orange (rot) sind zu 95% (99%) statistische signifikante Gebiete dargestellt.

6.2 Das Sommersignal

In Abschnitt 5.2.4 wurde vermutet, dass Änderungen auf der jeweiligen Sommerhemisphäre entweder durch direkte Einstrahlungsänderungen mit dem 11-jährigen Sonnenfleckenzklus oder über Änderungen der MRZ, welche durch dynamische Wechselwirkungsprozesse auf der Winterhemisphäre entstehen, hervorgerufen werden. Da das stärkste beobachtete Sonnensignal während des nordhemisphärischen Sommers in den Tropen und Subtropen auftritt und sehr unterschiedlich für die beiden QBO-Phasen ist (vgl. Abb. 2.9), soll an dieser Stelle mit Abb. 6.10 verdeutlicht werden, dass die Modellexperimente - wie auch bereits für das mittlere Sonnensignal diskutiert (Abschnitt 5.2.4) - im Nordsummer nicht in der Lage sind, ein zu Beobachtungen vergleichbares Signal zu reproduzieren. Der starke südhemisphärische PNJ verhindert eine Modulation des PNJs und der MRZ durch den Sonnenfleckenzklus (vgl. Abb. 6.4) und erklärt damit in gewisser Weise das geringe Sommersignal, welches sich für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment kaum voneinander unterscheidet (Abb. 6.10). Im Juli reichen die Temperaturdifferenzen für das QBO-West-Experiment lediglich um 30°S etwas weiter in die untere Stratosphäre/obere Troposphäre. Die Differenzen der geopotentiellen Höhe in der unteren Stratosphäre (30 hPa, 24 km) (Abb. 6.5 und 6.6) lassen geringfügig höhere und statistisch signifikantere Geopotentialdifferenzen für das QBO-Ost- als für das QBO-West-Experiment erkennen, was zumindest einen Hinweis in die richtige Richtung gibt. Wie für das mittlere Sonnensignal gezeigt (Abschnitt 5.2.4), ist das Signal auch während des südhemisphärischen Sommers im QBO-Ost- und QBO-West-Experiment sehr schwach (nicht gezeigt). Dies liegt vermutlich an dem im Vergleich zu Beobachtungen zu kurzen südhemisphärischen Sommer.

6.3 Diskussion der Ergebnisse

Wie in diesem Kapitel gezeigt wurde, konnte der aus Beobachtungen bekannte Zusammenhang zwischen Sonnen- und QBO-Signal im nordhemisphärischen Winter erstmals mit einem GCM unter „realistischer“ Vorgabe von UV-Strahlungs- und Ozonänderungen bestätigt werden. Diese Ergebnisse stellen eine bedeutende Verbesserung bisheriger Klimamodellstudien dar, welche die äquatorialen Winde entweder gar nicht oder nur sehr unzureichend, z. B. nur in der unteren Stratosphäre, berücksichtigten. Die hier vorgestellten Modellexperimente erlauben einige wichtige Hinweise bezüglich der Rolle der äquatorialen Winde für den Einfluss des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus auf die hohen Breiten der Winterhemisphäre, welche in Abb. 2.15 noch mit Fragezeichen behaftet sind.

6.3.1 Erzielte Verbesserungen

Folgende Ergebnisse wurden erreicht:

1. Das Modell reproduziert die in Beobachtungen gefundenen Zirkulationsverhältnisse bei bestimmten QBO- und Sonnenfleckenzyklus-Phasen im nordhemisphärischen Winter: warme, gestörte Winter treten bevorzugt unter Sonnenfleckenmaximum- und QBO-West-Bedingungen sowie Sonnenfleckenminimum- und QBO Ost-Bedingungen auf; kalte, ungestörte Winter findet man hingegen unter Sonnenfleckenminimum- und QBO-West- sowie unter Sonnenfleckenmaximum- und QBO-Ost-Bedingungen.
2. Die Phase der QBO bestimmt im Modell nur das zeitliche Auftreten des Sonnensignales im nordhemisphärischen Winter und bestätigt die aus Beobachtungsdaten vermuteten Zusammenhänge.

Diese Ergebnisse stellen eine Verbesserung im Vergleich zu vorangegangenen Modellstudien mit dem FUB-CMAM dar, welche im Folgenden betrachtet werden.

6.3.2 Vergleich zu anderen FUB-CMAM Experimenten

Die Experimente mit realistischem äquatorialen Windprofil ($k_{wmaeqbof}/k_{wmieqbof}$, $k_{wmawqbof}/k_{wmiwqbof}$) werden mit den Ergebnissen der Experimente ohne QBO (k_{wsomin}/k_{wsomax}) und denen mit einer künstlichen QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre ($k_{wqbo-max}/k_{wqbobomin}$) verglichen, um daraus Gründe für die erzielten Verbesserungen abzuleiten. In allen Experimenten wurden die gleichen Strahlungs- und Ozonänderungen vorgegeben. Unterschiede zwischen den Experimenten bestehen nur in der Hinzunahme künstlicher bzw. realistischerer äquatorialer Winde.

In Abb. 6.11a ist als Vergleich zu Abb. 6.1 die Nordpoltemperatur für das Experimentenpaar mit einer künstlichen QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre ($k_{wqbo-max}/k_{wqbobomin}$) für das Sonnenfleckenmaximum und -minimum dargestellt. In diesem Experimentenpaar ist der Maximum-Lauf durch niedrigere Temperaturen und geringere Variabilität im Vergleich zum Minimum-Lauf gekennzeichnet und widerspricht dem in Abb. 6.1 dargestellten und damit dem beobachteten Zusammenhang, in welchem eine deutlich unterschiedliche Variabilität für das QBO-West-Experiment unter Sonnenfleckenmaximum- und Sonnenfleckenminimum-Bedingungen auftritt. Das Experimentenpaar ohne QBO (Abb. 6.11b) zeigt ein zum Expe-

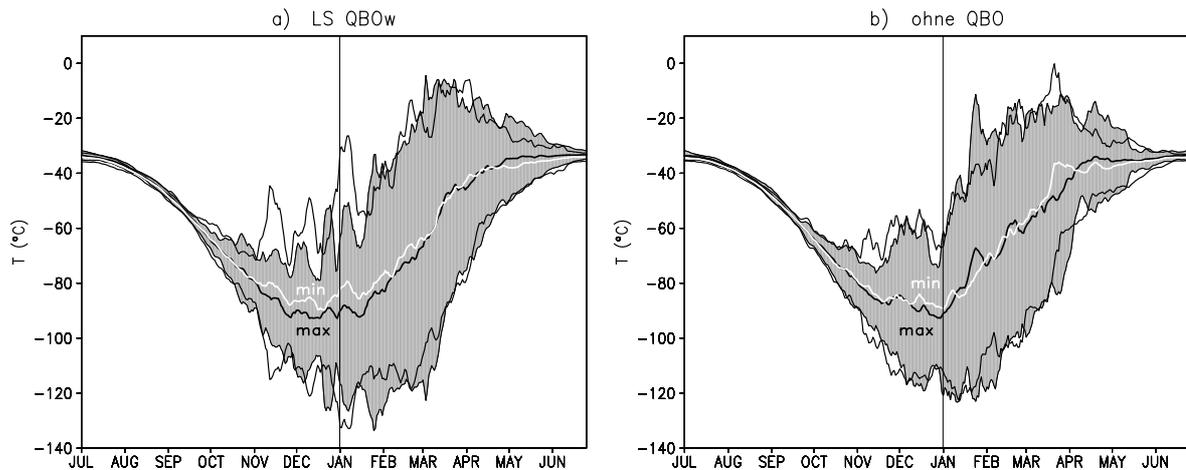


Abbildung 6.11: a) Wie Abb. 6.1 nur für die Sonnenfleckennormale (schwarz) und -minimum-Experimente (weiß) mit künstlicher QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre (kwqbmomax/kwqbmomin). b) wie a) nur für das Experimentenpaar ohne vorgegebene QBO (kwsomin/kwsomomax).

rimentenpaar mit einer künstlichen QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre ähnliches Signal. Das Signal ist für das QBO-West-Experiment jedoch deutlich stärker und das Sonnenfleckennormale-Experiment ist kälter als das Sonnenfleckennormale-Experiment. Auf die Gleichheit der Resultate dieser Experimentenpaare wurde bereits am Ende von Kapitel 4 bei der Darstellung der Jahresmittel der Temperaturdifferenzen hingewiesen (Abb. 4.5).

Offensichtlich führt eine Hinzunahme einer (künstlichen) QBO-Westphase **nur** in der unteren Stratosphäre nicht zu der gewünschten Antwort des Modells auf die vorgegebenen Strahlungs- und Ozonänderungen. Abb. 6.12a zeigt die vertikale Struktur des Modellsignales für dieses Experimentenpaar. Der PNJ ist im gesamten Winter (November-Mai) ununterbrochen im Sonnenfleckennormale- stärker als im Sonnenfleckennormale-Experiment, wobei maximale Winddifferenzen wieder auf die hohen Breiten beschränkt sind. Die Konzentration der stärksten Differenzen auf hohe Breiten passt qualitativ zum Verhalten des QBO-West-Experimentes in Abb. 6.4d. Die Differenzen in Abb. 6.12a sind statistisch nicht signifikant und in den Subtropen der oberen Stratosphäre ist kein Westwind-Initialsignal sichtbar. Das „typische“ Sonnensignal wird in diesem Experiment vermutlich unterdrückt (vgl. Abschnitt 6.3.3). Stattdessen ähneln die auftretenden Differenzen denen im Experimentenpaar ohne QBO (Abb. 6.12b), sind jedoch deutlich verstärkt und halten länger an.

Die Hinzunahme einer QBO nur in der unteren Stratosphäre führt offensichtlich zu einer zusätzlichen dynamischen Antwort des Modells, welche allerdings erst in die richtige, d.h. zu Beobachtungen vergleichbare, Richtung geht, wenn äquatoriale Winde über die gesamte Stratosphäre berücksichtigt werden. Erst die Hinzunahme von realistischeren Winden auch in der oberen Stratosphäre „verhalf“ dem Sonnensignal im Modell wirksam zu werden. Dies ist ein weiterer Hinweis darauf, dass die Implementierung realistischerer äquatorialer Windprofile über die gesamte Höhe der Stratosphäre entscheidend zu einer realistischeren Repräsentation des Sonnensignales beigetragen hat.

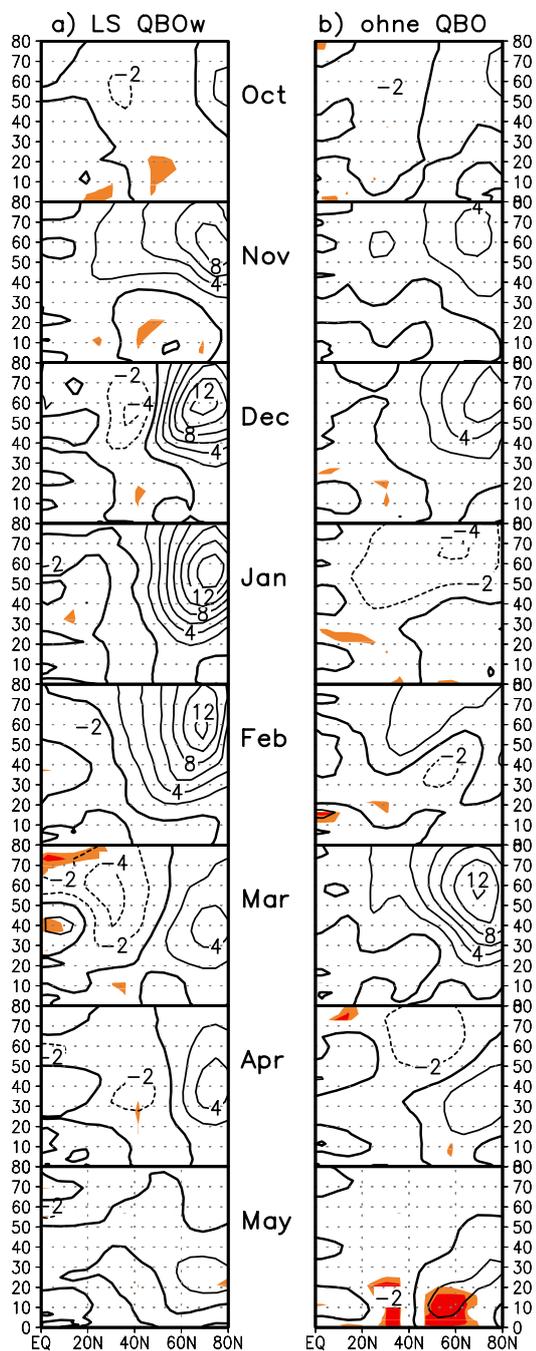


Abbildung 6.12: Wie Abb. 6.4b nur für a) das Experiment mit künstlicher QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre (kwqbomax-kwqbomin) und b) für das Experiment ohne QBO (kwsomax-kwsomin), welches am GRIPS-Vergleich beteiligt war (vgl. auch Abb. 2.14 FUB), Isolinienabstand: 2 m/s, statistisch signifikante Gebiete sind farbig dargestellt.

6.3.3 Die Verbesserung der Windklimatologie

Im Folgenden wird diskutiert und gezeigt, inwiefern sich die Windklimatologie durch die Hinzunahme realistischerer äquatorialer Windprofile verbessert hat und warum und wie das zu einer besseren Repräsentation des Sonnensignales im Modell geführt hat. Dazu wird zuerst die Ausprägung der SAO für die verschiedenen Experimente mit dem FUB-CMAM untersucht.

Die SAO

Im Abschnitt 3.4 sind bereits kurz die Stärken und Schwächen des Modells diskutiert worden. Das FUB-CMAM hat gegenüber anderen Modellen den entscheidenden Vorteil, dass eine modellinterne SAO existiert, deren Repräsentation durch die Implementierung realistischerer äquatorialer Windprofile sogar noch verbessert werden konnte (vgl. Abschnitt 3.3.3). Ein Vergleich der modellinternen SAO-Repräsentationen für die verschiedenen hier vorgestellten Experimente des FUB-CMAMs mit den Beobachtungen ist in Abb. 6.13 für die Stratopausenregion (1 hPa/48 km) dargestellt. Zu beachten ist, dass die Beobachtungen aufgrund der Kürze der zur Verfügung stehenden Daten nicht nach QBO- oder Sonnenfleckenzyklus-Phasen unterteilt wurden. Es geht vielmehr um die qualitative Übereinstimmung zwischen der beobachteten und der modellierten SAO. Im Vergleich zu Beobachtungen fallen gleich mehrere Unterschiede in der SAO-Repräsentation der einzelnen Experimente auf. Die SAO wird von den Experimenten mit realistischen Windprofilen, welche ein „typisches“ Sonnensignal im nordhemisphärischen Winter simulieren, am besten repräsentiert (Abb. 6.13d,e). Die SAO-Amplitude ist insgesamt mit Beobachtungen vergleichbar. Zum Zeitpunkt der beobachteten SAO-Westphasen (Oktober/November und April/Mai) treten schwache Ostwinde bzw. sogar schwache Westwinde auf und zum Zeitpunkt der SAO-Ostphasen (Januar/Februar und Juni/Juli) Ostwinde (–10 bis –20 m/s). Das Experiment ohne QBO, welches am GRIPS-Vergleich beteiligt war und nur ein sehr schwaches Signal zeigte, unterscheidet sich von den Experimenten mit realistischen Windprofilen durch stärkere Ostwinde (–30 bis –40 m/s) zum Zeitpunkt der SAO-Ostphase (Abb. 6.13b). Das Experiment mit einer künstlichen QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre, welches ein zum Experiment ohne QBO vergleichbares, aber deutlich stärkeres Signal zeigte und damit den Beobachtungen widerspricht, simuliert die SAO im Vergleich zu Beobachtungen am schlechtesten (Abb. 6.13c). Zum Zeitpunkt der beobachteten SAO-Westphasen treten starke Ostwinde auf (bis zu –30 m/s).

Der größte Unterschied zwischen den Experimenten tritt in der SAO-Repräsentation im Frühwinter (Oktober/November) auf, wenn sich die SAO in Beobachtungen in ihrer Westphase befindet, und sowohl in Beobachtungen als auch in den Experimentenpaaren mit realistischen äquatorialen Winden ein Sonneninitialsignal auftritt. Im November findet man beispielsweise in Beobachtungen schwache Westwinde, die am ehesten von den beiden Experimenten mit realistischen äquatorialen Windprofilen erreicht werden (Abb. 6.13a,d,e). Das Experiment ohne QBO ist durch relativ starke Ostwinde (–20 m/s) (Abb. 6.13b) und das Experiment mit künstlicher QBO-Westphase durch sehr starke Ostwinde (–30 m/s) gekennzeichnet (Abb. 6.13c). Dieser Vergleich legt den Schluss nahe, dass zu starke Ostwinde in der oberen tropischen Stratosphäre ein Sonneninitialsignal im Frühwinter und damit das Auftreten von Stratosphärenerwärmungen in den hohen Breiten im Spätwinter unterdrücken. Die Modellexperimente zeigen, dass die SAO ein wichtiger Aspekt für die Simulation des Sonnensignales ist. Sie betonen außerdem, dass die SAO für eine insgesamt realistischere Simulation der Klimatologie in den Modellen benötigt wird.

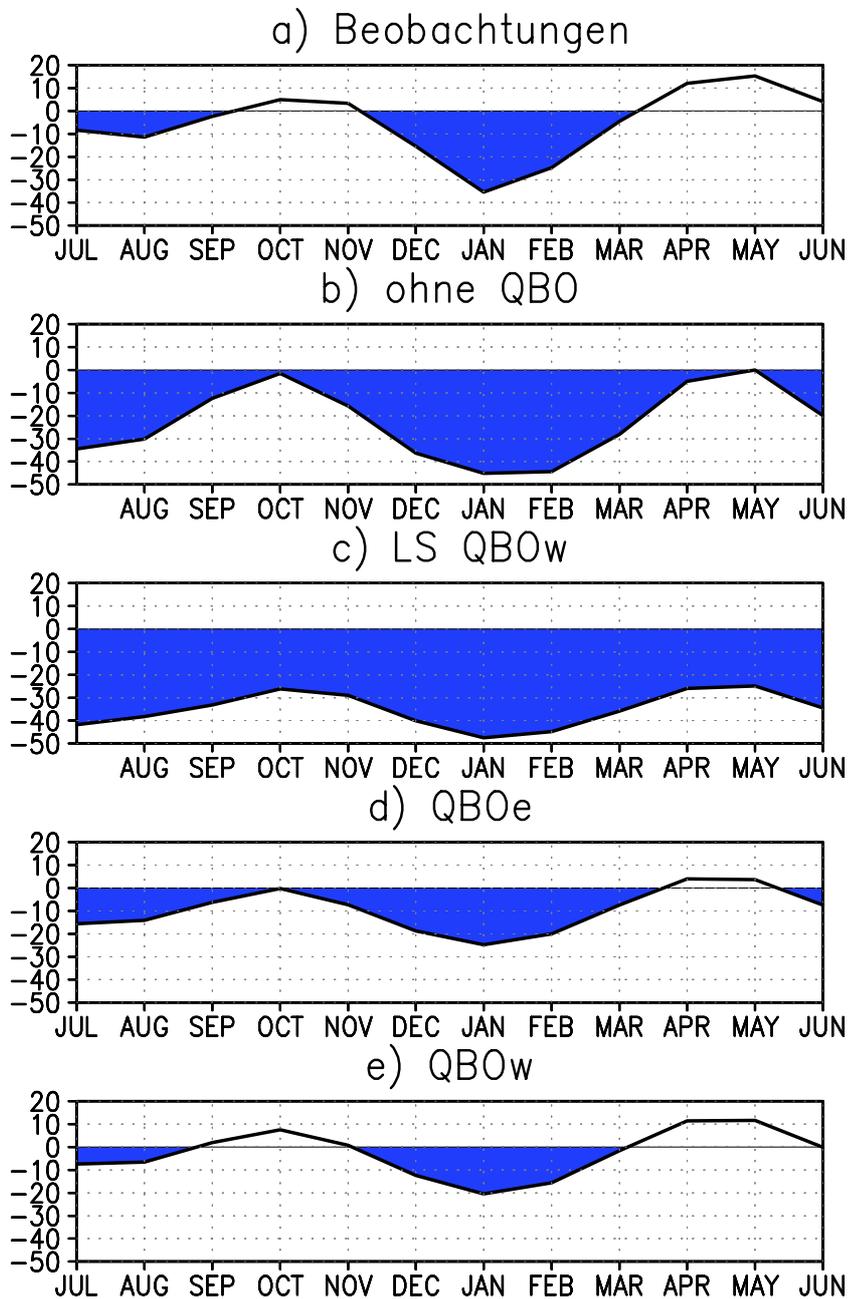


Abbildung 6.13: Zeitreihe des zonal gemittelten zonalen Windes in m/s am Äquator für a) die SPARC-Klimatologie (1992-1997), b) die Sonnenfleckenminimum-Experimente (gemittelt von $2,8^{\circ}\text{S}$ bis $2,8^{\circ}\text{N}$) von Juli bis Juni im Stratopausenniveau (1 hPa/48 km) ohne QBO, c) mit künstlicher QBO-Westphase nur in der unteren Stratosphäre, d) realistisches Windprofil mit einer QBO-Ostphase und e) einer QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre. Ostwinde sind blau gefärbt.

6.3.4 Die SAO-Ausprägung, das Westwind-Initialsignal und der subtropische Strahlstrom

Für die Experimente mit realistischen äquatorialen Windprofilen wird nun die Abhängigkeit der SAO-Amplitude von solaren Einstrahlungsänderungen, die unterschiedliche Ausprägung des Westwind-Initialsignals im QBO-Ost- und QBO-West-Experiment, sowie die im Vergleich zu Beobachtungen zu geringe Variabilität in den Subtropen untersucht.

Die Ausprägung der SAO in Abhängigkeit von solaren Einstrahlungsänderungen

Sowohl für das Sonnenfleckmaximum- als auch für das Sonnenfleckminimum-Experiment erfolgte die Anpassung an die in Abb. 3.12 dargestellten äquatorialen Windprofile in gleicher Art und Weise. Daher kann man davon ausgehen, dass Änderungen im äquatorialen zonal gemittelten zonalen Wind entweder auf diese solaren Einstrahlungsänderungen oder aber auf interne Modellvariabilität zurückzuführen sind. Abb. 6.14 zeigt die unterschiedliche jahreszeitliche Entwicklung des äquatorialen Windprofiles zwischen dem Sonnenfleckmaximum und -minimum für das QBO-Ost- (Abb. 6.14c) und das QBO-West-Experiment (Abb. 6.14d). Grundsätzlich treten für das QBO-Ost-Experiment größere Unterschiede als für das QBO-West-Experiment auf, welche sich auf einen Höhenbereich von 50 bis 60 km (1-0,1 hPa), den Bereich der SAO (vgl. Abb. 6.14a,b), konzentrieren. Für das QBO-Ost-Experiment ist die Amplitude der SAO im Sonnenfleckmaximum stärker als im Sonnenfleckminimum, wobei der stärkste signifikante Einfluss im Oktober (Zeitpunkt der SAO-Westphase) und Januar (Zeitpunkt der SAO-Ostphase) auftritt (Abb. 6.14a und Abb. 6.14c). Für das QBO-West-Experiment ist die Verstärkung der SAO-Amplitude bzw. sogar eine leichte Abschwächung im Oktober sehr viel geringer und statistisch nicht signifikant.

Die Unterschiede zwischen dem QBO-Ost- und dem QBO-West-Experiment in der SAO-Ausprägung in Abhängigkeit vom Sonnenfleckenzklus könnten mit der unterschiedlichen Ausprägung der SAO zusammenhängen (Abb. 6.14a,b). Für das QBO-West-Experiment reichen die Westwinde weiter in die obere Stratosphäre, während sie für das QBO-Ost-Experiment ein Maximum in 65 km Höhe ($\sim 0,1$ hPa) aufweisen. Die unterschiedliche Ausprägung der SAO im QBO-Ost- und QBO-West-Experiment unabhängig von solaren Einstrahlungsänderungen (Abb. 6.14a,b) hängt vermutlich mit unterschiedlichen Ausbreitungsbedingungen für (tropische) Wellen zusammen. Indem nur der zonal gemittelte zonale Wind relaxiert wurde, kann eine Ausbreitung von den tropischen Wellen (Abweichungen vom zonalen Mittel) stattfinden, die im Modell aufgelöst werden. Die tropischen Wellen, die sich vertikal in die Stratosphäre ausbreiten, sind für die Anregung der SAO wichtig. Je nachdem welche Winde in der unteren Stratosphäre herrschen (QBO Ost oder QBO West) ändern sich die Ausbreitungsbedingungen für die Wellen und beeinflussen die Ausprägung der SAO. Um hier genauere Aussagen zu treffen, müsste man allerdings das Wellenspektrum sowie die Veränderung des Grundstromes durch die Dissipation der tropischen Wellen untersuchen.

Vergleicht man den Jahresgang der Differenzen der kurzwelligen Erwärmungsraten zwischen Sonnenfleckmaximum und -minimum für die beiden QBO-Experimente am Äquator mit dem Jahresgang der Temperaturdifferenzen (Abb. 6.14e,f), stellt man fest, dass sich die maximale Differenz der kurzwelligen Erwärmungsraten im Januar an der äquatorialen Stratopause befindet (nicht gezeigt), während man dort mehrere Maxima der Temperaturdifferenzen findet. Das bedeutet, dass der direkte Strahlungseffekt, der für beide Experimente gleich ist, die Änderungen in der SAO-Ausprägung alleine nicht erklären kann. Zusätzlich bestätigen die Unterschiede

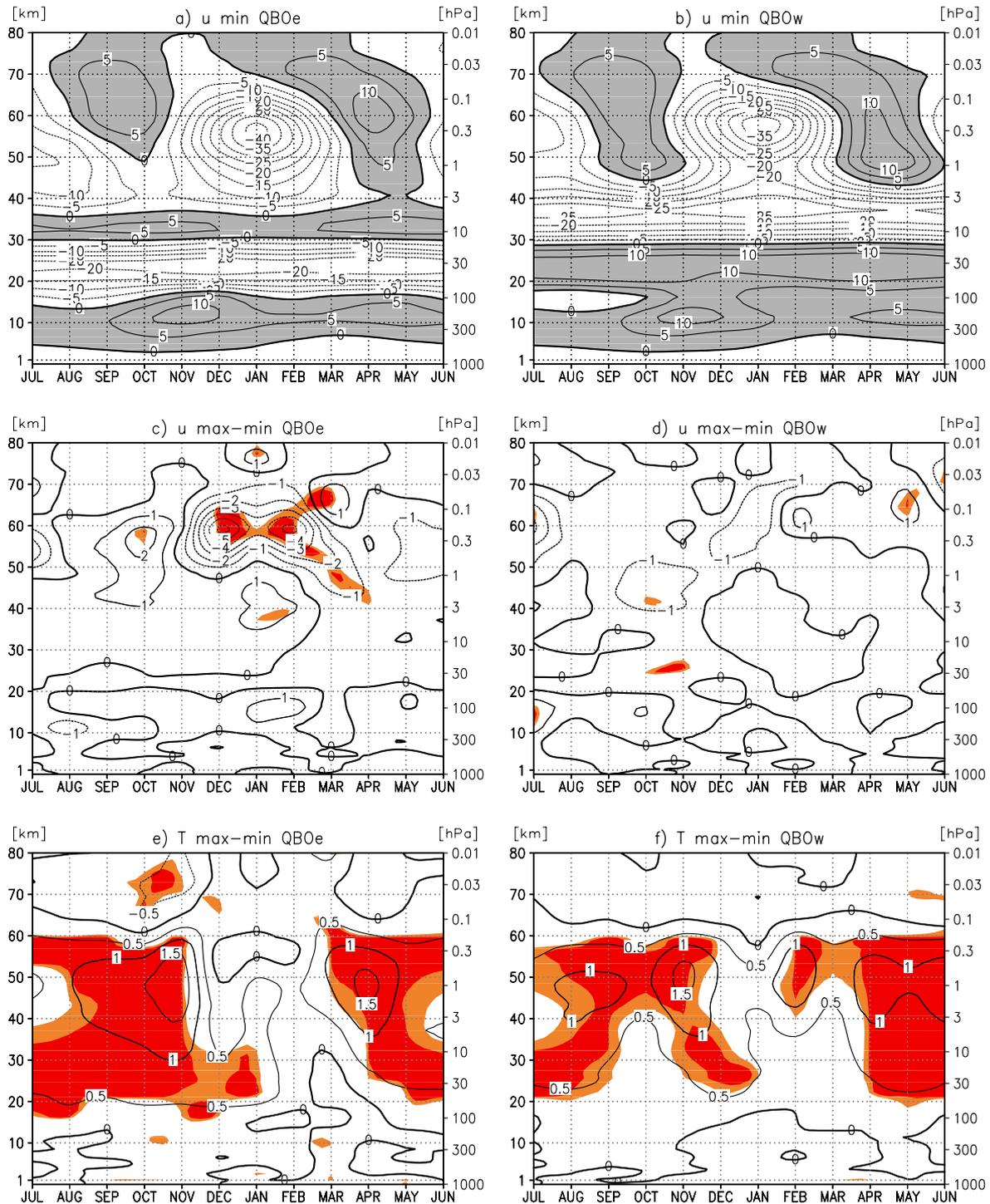


Abbildung 6.14: Zeitreihen der Monatsmittel des zonal gemittelten zonalen Windes am Äquator (gemittelt von $2,8^{\circ}\text{S}$ bis $2,8^{\circ}\text{N}$) in m/s von Juli bis Juni über den gesamten Modellhöhenbereich für a) das Sonnenfleckenminimum-QBO-Ost-Experiment, b) das Sonnenfleckenminimum-QBO-West-Experiment (Isolinienabstand: 5 m/s), c) die Differenz zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum des QBO-Ost-Experimentes und d) die Differenz zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum des QBO-West-Experimentes (Isolinienabstand: 1 m/s, statistisch signifikante Gebiete sind farbig dargestellt), e) wie c) nur für die Differenz der zonal gemittelten Temperatur (Isolinienabstand: 0,5 K), f) wie d) für die Differenz der zonal gemittelten Temperatur.

der Temperaturdifferenzen für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment (Abb. 6.14e,f) die Unterschiede der Winddifferenzen (Abb. 6.14c,d), welche im QBO-Ost-Experiment stärker als im QBO-West-Experiment sind. Für das QBO-West-Experiment treten die stärksten Temperaturdifferenzen im Vergleich zum QBO-Ost-Experiment vom Äquator verschoben auf (vgl. Abb. 6.4a,c) und erklären in gewisser Weise die schwächeren Temperatur- und Windsignale für dieses Experiment am Äquator.

Diese im Modell gefundene unterschiedliche Ausprägung des SAO-Amplituden in Abhängigkeit von den solaren Einstrahlungsänderungen (stärkere SAO-Amplitude im Sonnenfleckenmaximum) stimmt beispielsweise mit Beobachtungen von Nastrom und Belmont (1980) überein, welche unter Sonnenfleckenmaximum-Bedingungen eine stärkere Amplitude während der SAO-Westphasen beobachteten. Bisher gibt es aber keine Studie, welche die Beeinflussung der SAO-Amplituden in Abhängigkeit von der Phase des Sonnenfleckenzyklus und der QBO untersucht hat. Im Modell zeigte sich für das QBO-West-Experiment die Verstärkung der SAO-Amplitude nicht so deutlich wie im QBO-Ost-Experiment. Die im Modell gefundenen Zusammenhänge können nicht mit anderen Studien verglichen werden.

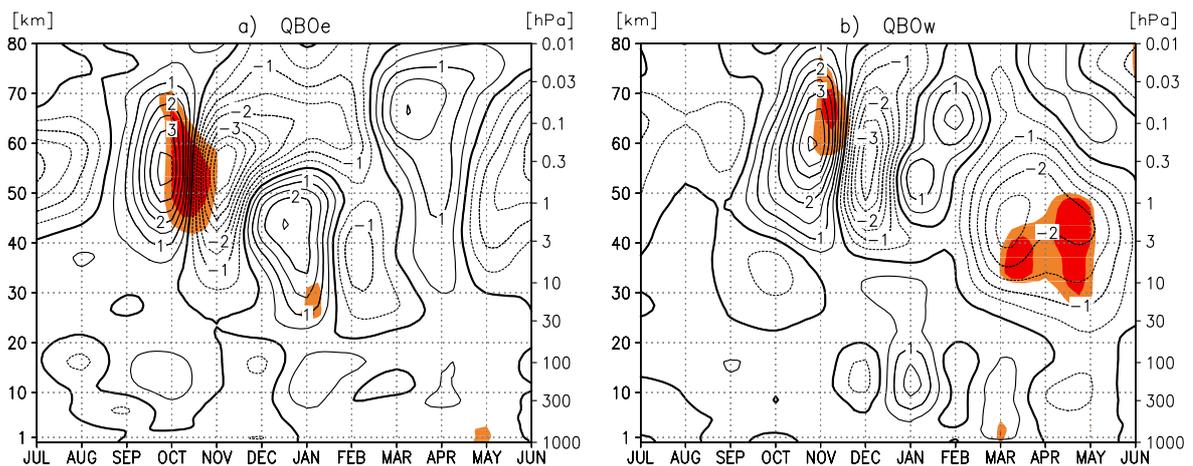


Abbildung 6.15: Zeitreihen der Differenzen des zonal gemittelten zonalen Windes in m/s in 20°N von Juli bis Juni über den gesamten Modellhöhenbereich für a) das QBO-Ost-Experiment und b) das QBO-West-Experiment, Isolinienabstand: 0,5 m/s, statistisch signifikante Gebiete sind farbig gekennzeichnet.

Die Ausprägung des Westwind-Initialsignals

In Abschnitt 6.1.2 (Abb. 6.4) ist bereits daraufhingewiesen worden, dass sich das in beiden Experimenten auftretende Westwind-Initialsignal im Oktober und November zum Teil durch einen direkten Strahlungseinfluss erklären lässt. In Abb. 6.15 ist die Zeitreihe der Differenzen des zonal gemittelten zonalen Windes in einer Breite von 20°N , in der das Westwind-Initialsignal im Oktober/November auftauchte (vgl. Abb. 6.4b,d), für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment dargestellt. Deutlich erkennt man die statistisch signifikanten Westwind-Initialsignale im Oktober des QBO-Ost- (3,5 m/s in 55 km Höhe) und im November des QBO-West-Experimentes (4,5 m/s in 60 km Höhe). Bemerkenswert ist hier, dass die stärkeren Differenzen im QBO-West-Experiment in 20°N auftreten, am Äquator waren sie für das QBO-Ost-Experiment stärker (Abb. 6.14c,d). Dies passt zu den Temperaturdifferenzen im QBO-West-Experiment, welche vom Äquator in Richtung höhere Breiten verschoben sind (Abb. 6.4c).

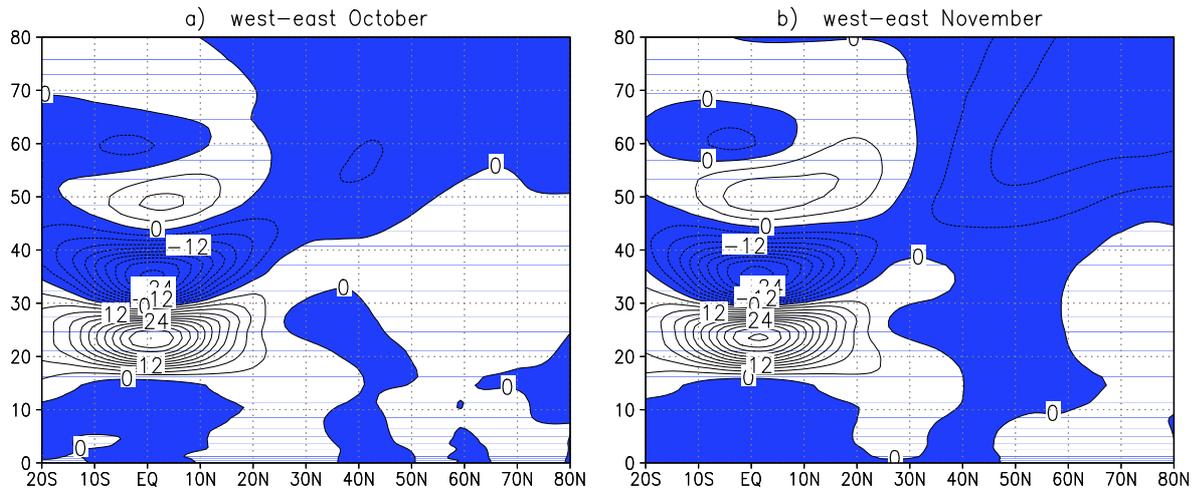


Abbildung 6.16: Differenz des zonal gemittelten zonalen Windes zwischen der mittleren QBO-West- und der mittleren QBO-Ostphase von 20°S bis 80°N und 0-80 km Höhe (1000-0,01 hPa) für a) den Oktober und b) den November, Isolinienabstand: 3 m/s, negative Differenzen sind blau gefärbt.

Die unterschiedliche Stärke und das unterschiedliche zeitliche Auftreten des Westwind-Initialsignals in den beiden QBO-Experimenten sollen nun weiter untersucht werden.

Dazu ist in Abb. 6.16 die Differenz zwischen einer mittleren QBO-Westphase und einer mittleren QBO-Ostphase in der unteren Stratosphäre im Oktober und November dargestellt. Dafür wurde über die beiden Phasen des Sonnenfleckenzyklus gemittelt: $QBO\ West = (\max W + \min W) / 2$ und $QBO\ Ost = (\max E + \min E) / 2$, so wie in Kapitel 5 die QBO erst einmal herausgemittelt wurde. Die Differenz zwischen einer mittleren QBO-West- (QBO-Ost-) und einer mittleren QBO-Ostphase (QBO-Westphase) entspricht am Äquator der vertikalen Struktur bei einer QBO-Westphase (QBO-Ostphase) in der unteren tropischen Stratosphäre. Besonders auffallend ist die bereits mehrfach angesprochene „Sandwichstruktur“ am Äquator, die im Oktober bei einer mittleren QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre durch die dreilagige Abfolge von West-Ost-West (Abb. 6.16a) und bei einer mittleren QBO-Ostphase durch die Abfolge Ost-West-Ost gekennzeichnet ist (zu Abb. 6.16a invers). Noch ausgeprägter ist diese Struktur im November (Abb. 6.16b). Neben der vertikalen Struktur am Äquator, ist auch die Erstreckung der Differenzen in die subtropischen und mittleren Breiten der Nordhemisphäre bemerkenswert. Für die QBO-Westphase erstrecken sich im Oktober (Abb. 6.16a) die negativen Differenzen von der äquatorialen mittleren Stratosphäre polwärts von 20°N bis in die obere Stratosphäre und in die Mesosphäre der mittleren und hohen Breiten. In diesem Gebiet kommt es daher in der QBO-Westphase (QBO-Ostphase) zu einer Abschwächung (Verstärkung) des Westwind-Initialsignals (vgl. Abb. 5.6b,d und Abb. 6.15). Im Oktober erklärt diese unterschiedliche Ausprägung der Hintergrundströmung für eine QBO-Ost- und eine QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre folglich unter anderem die unterschiedliche Ausprägung des Westwind-Initialsignals in den beiden QBO-Experimenten (vgl. Abb. 6.4b,d). Dieser im Modell gefundene Zusammenhang wurde bereits aus Beobachtungen abgeleitet und ist schematisch in Abb. 2.17 dargestellt (K. Kodera, persönliche Mitteilung, 2002).

Im November passen die positiven Winddifferenzen in 55 km Höhe und zwischen 10° und 30°N bei einer QBO-Westphase in der unteren Stratosphäre zu dem stärkeren Initialsignal zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum im QBO-West- im Vergleich zum QBO-Ost-

Experiment. Die unterschiedliche Ausprägung der Windsignale in der tropischen/subtropischen oberen Stratosphäre/unteren Mesosphäre zwischen QBO-Ost- und West-Experiment ist sehr gut in Abb. 6.4b und Abb. 6.4d zu sehen.

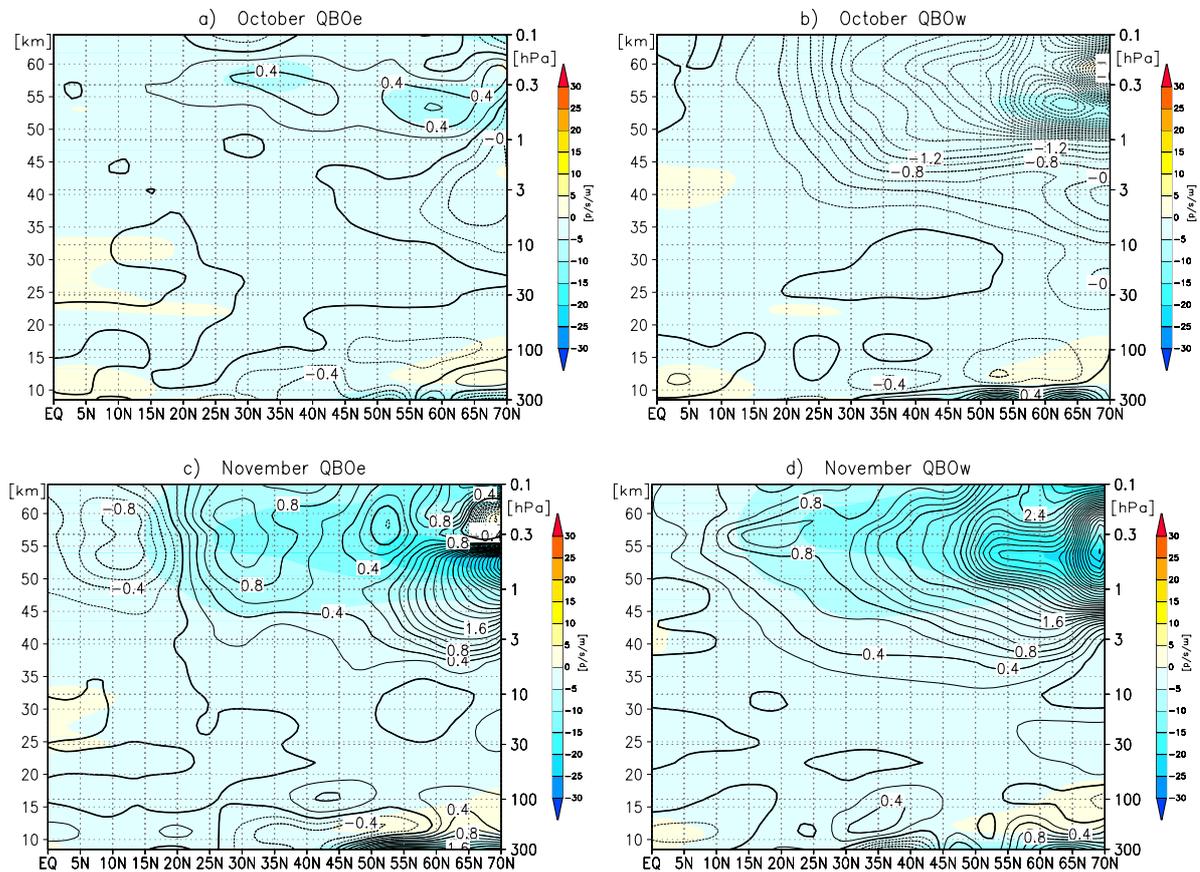


Abbildung 6.17: Absolutfeld der Divergenz des EP-Vektors für das Sonnenfleckenminimum-Experiment (farbig), die Differenz des Divergenzfeldes zwischen Sonnenfleckenmaximum- und Sonnenfleckenminimum-Experiment (Isolinienabstand: 0,2 m/s/d) für a) Oktober des QBO-Ost-Experimentes, b) Oktober des QBO-West-Experimentes, c) wie b) nur für den November, d) wie b) nur für den November.

Wenn die Hintergrundströmung in den beiden QBO-Phasen durch die unterschiedliche vertikale Struktur am Äquator verschieden ist, hat dies einen Einfluss auf die Welle-Grundstrom-Wechselwirkung. Der Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Westwind-Initialsignalen im Oktober/November der beiden QBO-Experimente und den Ausbreitungsbedingungen für planetarische Wellen wird anhand von Abb. 6.17 untersucht. Im QBO-West-Experiment findet im Gegensatz zum QBO-Ost-Experiment bereits im Oktober eine signifikant unterschiedliche Welle-Grundstrom Wechselwirkung zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum statt (Abb. 6.17a,b). Während man im QBO-Ost-Experiment im Oktober (Abb. 6.17a) eine schwache relative Beschleunigung in der subtropischen oberen Stratosphäre genau in dem Bereich des Westwind-Initialsignales findet, ist für das QBO-West-Experiment eine relative Abschwächung zu finden (Abb. 6.17b), die zu dem geringeren Westwind-Initialsignal passt (Abb. 6.4d). Erst im November (Abb. 6.17c) bekommt man auch für das QBO-West-Experiment ein Maximum der relativen Beschleunigung in 20°N und 55 km Höhe, welches zu der Verstärkung der Westwindanomalie in diesem Monat passt. Offensichtlich führt die unterschiedliche Wechselwirkung

zwischen Wellen und Grundströmung in den beiden QBO-Experimenten zu einer unterschiedlichen Ausprägung des Westwind-Initialsignales.

Während man im Oktober des QBO-Ost-Experimentes eine relative Beschleunigung der Grundströmung im Bereich des Westwind-Initialsignales findet, ist im November äquatorwärts von 20°N und 55 km Höhe eine relative Abschwächung und eine relative Beschleunigung in Richtung hohe Breiten, sowie eine starke Beschleunigung in mittleren bis hohen Breiten zu finden. Dies passt zu den Winddifferenzen in Abb. 6.4b, welche negativ äquatorwärts von 20°N und positiv polwärts sind. Die relative Konvergenz (Abschwächung) in den Tropen und die relative Divergenz (Beschleunigung) in hohen Breiten führt im QBO-Ost-Experiment zu der Verlagerung der Westwinddifferenz von Oktober bis November in die hohen Breiten. Für das QBO-West-Experiment tritt dies einen Monat später auf (nicht gezeigt).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Westwind-Initialsignal durch eine Kombination verschiedener Faktoren entsteht. Zum einen ist der direkte Temperatureinfluss (Strahlungseinfluss) für die Ausprägung des Signales im Oktober wichtig (Abb. 6.4), zum anderen spielt aber auch die Hintergrundströmung, die für die beiden QBO-Phasen unterschiedlich ist, eine wichtige Rolle (Abb. 6.16). Schließlich führt die unterschiedliche Grundströmung im QBO-West- und QBO-Ost-Experiment zu einer unterschiedlichen Welle-Grundstrom-Wechselwirkung (Abb. 6.17), die zu der unterschiedlichen Ausprägung des Initialsignales beiträgt. Die Wanderung des Westwindsignals von den Tropen und Subtropen in die mittleren und hohen Breiten findet in beiden QBO-Phasen durch eine Grundstrom-Welle-Wechselwirkung statt. Für das QBO-Ost-Experiment findet dies von Oktober bis November (Abb. 6.17a,c), für das QBO-West-Experiment von November bis Dezember (nicht explizit gezeigt) statt. Mit diesen Ergebnissen können erstmals Vermutungen aus Beobachtungen bestätigt werden (K. Kodera, persönliche Mitteilung, 2002).

Die unterschiedliche Ausprägung der SAO im Sonnenfleckenmaximum und -minimum könnte mit dem Westwind-Initialsignal im Zusammenhang stehen. Während das Westwindsignal für das QBO-Ost-Experiment zu der Verstärkung der SAO-Westphase (Abb. 6.14c) in diesem Monat passt und diese Anomalie in Abb. 6.4b auch eine signifikante Verbindung zwischen tropischen und subtropischen Breiten zeigt, ist dieser Zusammenhang für das QBO-West-Experiment, in dem sogar ein leichte Abschwächung der SAO-Westphase (Abb. 6.14d) zu erkennen ist, nicht gegeben. Der von Hood (2003) vermutete Zusammenhang zwischen der Verstärkung der Amplitude während der SAO-Westphase im Frühwinter unter Sonnenfleckenmaximum-Bedingungen und dem subtropischen Westwind-Initialsignal bestätigt sich im Modell für das QBO-Ost- jedoch nicht für das QBO-West-Experiment.

Es sollte an dieser Stelle noch einmal hervorgehoben werden, dass das Auftreten der Initialsignale für beide Experimente auf eine insgesamt realistischere Repräsentation der SAO zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 6.3.3). Erst durch diese realistischere Repräsentation wurde das Sonneninitialsignal „sichtbar“. Die Amplitude der SAO-Westphase ist im Vergleich zu Beobachtungen im Modell allerdings immer noch um etwa 10 m/s zu schwach und könnte damit ein Grund für das im Vergleich zu Beobachtungen schwächere Initialsignal im Modell sein. Ein weiterer Grund für das zu schwache Initialsignal könnte im Zusammenhang mit dem subtropischen stratosphärischen Strahlstrom stehen, auf welchen nun etwas genauer eingegangen wird.

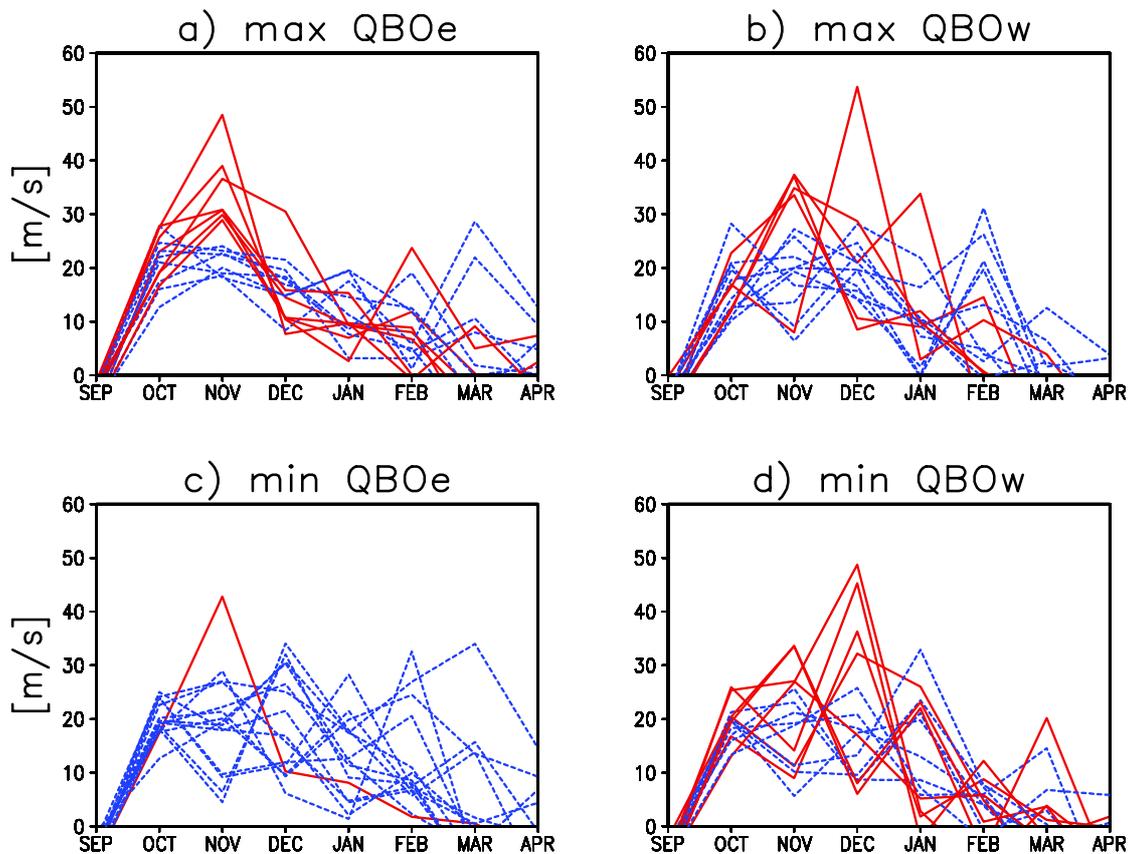


Abbildung 6.18: Zeitreihe der Monatsmittel des zonal gemittelten zonalen Windes in m/s für die einzelnen Modelljahre in 35°N und einer Höhe von 0,3 hPa (53 km) von September bis April für die Sonnenfleckensmaximum- (oben) und die Sonnenfleckensminimum-Experimente (unten) für das QBO-Ost- (links) und das QBO-West-Experiment. Die Abbildung ist in Anlehnung an Fig. 4 aus Kodera et al. (2003) erstellt worden, Jahre mit stärkeren Winden sind in rot und Jahre mit schwächeren Winden in blau dargestellt.

Der stratosphärische subtropische Strahlstrom

Obwohl man durch die Hinzunahme von realistischeren äquatorialen Windprofilen auch eine Verbesserung der subtropischen Windklimatologie erhält (vgl. Abschnitt 3.4, Abb. 3.16), ist gerade die Variabilität im Bereich der subtropischen (oberen) Stratosphäre im Vergleich zu Beobachtungen immer noch zu gering. Dies gilt sowohl für die QBO-Ost- als auch für die QBO-West-Experimente. In den Beobachtungen findet man im Frühwinter einen subtropischen Strahlstrom in der oberen Stratosphäre (vgl. z. B. Abb. 3.15), der durch eine hohe Variabilität gekennzeichnet ist, die sich im Laufe des Winters in die hohen Breiten in die Region des PNJs verlagert. Im Modell findet aufgrund des starken, nicht zum Äquator geneigten PNJs die größte Variabilität in hohen Breiten statt (Abschnitt 3.4).

Abb. 6.18 zeigt die Problematik der zu geringen subtropischen Variabilität für die QBO-Ost- und West-Experimente sowie deren Abhängigkeit von der Phase des Sonnenfleckenzyklus. In Beobachtungen treten in dem in Abb. 6.18 gezeigten Bereich im November und Dezember Windgeschwindigkeiten von 50–100 m/s für die Sonnenfleckensmaximum- und 30–70 m/s für

die Sonnenfleckenminimumjahre auf (Kodera et al., 2003). Diese starke Variabilität ist an einem Anstieg der Standardabweichung erkennbar (nicht gezeigt) und fällt mit dem Zeitpunkt zusammen, an dem die größten Unterschiede zwischen Maximum und Minimum auftreten. Im Modell treten im Vergleich zu den Beobachtungen deutlich geringere Windgeschwindigkeiten auf, die die allgemein geringere Variabilität sowie das Fehlen eines „richtigen“ subtropischen Strahlstromes in diesem Bereich zeigen. Anhand der Standardabweichung (nicht gezeigt) erkennt man ebenfalls die im Vergleich zu Beobachtungen zu geringe Variabilität in diesem Bereich.

In Abb. 6.18 erkennt man, dass die aus Beobachtungen abgeleitete stärkere Ausprägung der subtropischen Winde im Sonnenfleckenmaximum (vgl. Abb. 2.18) im Modell zumindest für die QBO-Ostphase zu erkennen ist (Abb. 6.18 links). Im Mittel werden im Sonnenfleckenmaximum-Experiment des QBO-Ost-Laufes höhere Windgeschwindigkeiten (18–50 m/s) als im Sonnenfleckenminimum (5–40 m/s) erreicht. Zusätzlich können im Sonnenfleckenmaximum zwei Zustände der subtropischen Winde vergleichbar zu Beobachtungen ausgemacht werden. In einigen Jahren verstärken sich die Winde bis zum November und erreichen höhere Windgeschwindigkeiten (rot gekennzeichnet), während das Windmaximum in den anderen Jahren bereits im Oktober auftritt und von dort kontinuierlich abnimmt (blau gekennzeichnet). Im Sonnenfleckenminimum nimmt die Windgeschwindigkeit in allen Jahren bis auf ein Jahr von Oktober an ab. Für die QBO-West-Experimente sind diese in Beobachtungen (für ein mittleres Sonnensignal) gefundenen Zustände nicht mehr ganz so deutlich (Abb. 6.18 rechts). Im Sonnenfleckenminimum scheinen die Winde stärker als im -maximum zu sein und die beiden Phasen von stärkeren und schwächeren Winden (rot und blau gekennzeichnet) sind nicht mehr so klar voneinander getrennt. Auch hierbei ist wieder anzumerken, dass es kaum Untersuchungen für die Unterschiede zwischen den beiden QBO-Phasen in Abhängigkeit vom Sonnenfleckenzyklus anhand von Beobachtungsdaten gibt und ein Vergleich daher nicht möglich ist. Es gibt jedoch Hinweise aus Beobachtungen, dass die Beeinflussung des subtropischen Strahlstromes für die QBO-Ostphase stärker als für die QBO-Westphase ausgeprägt ist (Kodera, 2001, persönliche Mitteilung), was in gewisser Hinsicht zu den im Modell gefundenen Ergebnissen passt.

6.4 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die verschiedenen Faktoren, welche zu einer Verbesserung der Windklimatologie im Modell geführt haben, diskutiert worden. Außerdem ist ausführlich dargestellt worden, wie diese Verbesserungen zu einer besseren Repräsentation des Sonnensignales im Modell geführt haben. Die wichtigsten Ergebnisse der Diskussion werden noch einmal zusammengefasst:

- Die in Beobachtungs- und mechanistischen Modellstudien gezeigte Wichtigkeit der Winde in der oberen Stratosphäre für die nordhemisphärische Winterentwicklung konnte erstmals mit einem GCM bestätigt werden.
- Die SAO ist für die Simulation eines Sonnensignales im Modell entscheidend.
- Eine realistischere Repräsentation der SAO wird in den Modellen daher allgemein für realistischere Simulationen benötigt.

- Die Ausprägung des Westwind-Initialsignals ist eine Kombination aus direktem Strahlungssignal und Hintergrundströmung sowie Welle-Grundstrom-Wechselwirkungen und ist für das QBO-Ost- und das QBO-West-Experiment unterschiedlich.
- Die Unterschiede der Welle-Grundstrom-Wechselwirkung zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum führen zu einer Verlagerung des Signales in die hohen Breiten. Dies findet für beide QBO-Phasen statt, ist aber zeitlich um einen Monat verschoben.
- Das im Vergleich zu Beobachtungen zu geringe Signal in subtropischen Breiten lässt sich mit der geringeren Variabilität des subtropischen Strahlstromes im Modell erklären.

Die hier erzielten Ergebnisse stellen eine erhebliche Verbesserung bisheriger Klimamodelstudien dar und geben erstmals Hinweise auf die zugrunde liegenden Prozesse, welche zu einem Sonnensignal in Kombination mit der QBO führen. Außerdem geben sie wichtige Hinweise, welche Prozesse in zukünftigen Modellstudien berücksichtigt bzw. verbessert werden sollten. Die Ergebnisse der Kapitel 5 und 6 haben sehr deutlich gezeigt, dass der 11-jährige Sonnenfleckenzyklus neben den direkten Effekten in der oberen Stratosphäre auch indirekte Effekte in der unteren Stratosphäre zur Folge hat, deren Einfluss auf die Troposphäre bereits an mehreren Stellen angemerkt und im nun folgenden Kapitel näher betrachtet wird.

