

HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Fakultät für Geoinformation

Geoinformatik und Satellitenpositionierung

Sommersemester 2013

- Bachelorarbeit -

Ableitung von Signalen laufender planetarer Wellen aus dem Dynamischen Aktivitätsindex (DAI) und Vergleich der mesosphärischen Aktivität planetarer Wellen

von

Johanna Schack

Mai 2013

Betreuer HM Prof. Dr. Heinrich Wimmer
Betreuer DLR Dr. Sabine Wüst



HOCHSCHULE
FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN
MÜNCHEN



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt

Fakultät für Geoinformation

Geoinformatik und Satellitenpositionierung

Sommersemester 2013

- Bachelorarbeit -

Analysis of the Dynamical Activity Index (DAI) with respect to travelling planetary waves and comparison with mesospheric planetary wave activity

von

Johanna Schack

Mai 2013

Betreuer HM Prof. Dr. Heinrich Wimmer
Betreuer DLR Dr. Sabine Wüst

Zusammenfassung

Anhand dieser Arbeit soll mithilfe von Messdaten aus unterschiedlichen Höhenbereichen die Aktivität laufender planetarer Wellen in der Atmosphäre untersucht werden.

Dafür wurden Daten der Fernerkundungssensoren TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer), OMI (Ozone Monitoring Instrument) und GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2), die eine 33-jährige Zeitreihe von Ozondaten produziert haben, verwendet. Ebenso werden die Temperaturdaten von GRIPS (Ground-based Infrared P-branch Spectrometer) und SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) Instrumenten genutzt. Damit die Entstehung laufender planetarer Wellen global über die gesamte Höhe der Atmosphäre nachvollzogen werden kann. Für die Analyse wurden sowohl Fortran77-Programme, als auch IDL-Programme erstellt und angewandt.

Ziel der Analyse war die Enttrendung der Ozondaten, um die Anteile der laufenden planetaren Wellen von dem quasistationären Anteil zu trennen. Dazu wurden zwei Verfahren angewendet, zum einen die harmonischen Analyse, zum anderen der kubischen Spline. Da sich die Ergebnisse beider Verfahren sehr ähnelten, wurde im Anschluss das Hauptaugenmerk auf die Analyse durch den kubischen Spline gelegt. Darauffolgend wurde eine Maßzahl für laufende planetare Wellen für jedes Jahr abgeleitet. Dieses Vorgehen fand analog zu ausgewählten Höhen der SABER-Daten statt. Anschließend folgte ein Vergleich der erzeugten Zeitreihen mit der Aktivität laufender planetarer Wellen der Mesopause (Daten wurden bereitgestellt).

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
2 Physikalische Grundlagen	3
2.1 Aufbau der Atmosphäre	3
2.2 Planetare Wellen	5
2.3 Mehrjährige Oszillationen in der Atmosphäre	9
2.3.1 Quasi-Biennale Oszillation (QBO)	9
2.3.2 Solarer Einfluss	11
3 Datengrundlage	14
3.1 Ozon	14
3.1.1 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)	14
3.1.2 Ozone Monitoring Instrument (OMI)	15
3.1.3 Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2)	16
3.2 Temperatur	18
3.2.1 Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER)	18
3.2.2 Ground-based Infrared P-branch Spectrometer (GRIPS)	18
3.3 Dynamischer Aktivitätsindex (DAI)	20
4 Analyseverfahren	25
4.1 Harmonische Analyse (HA)	25
4.2 Spline	27
5 Ergebnisse und Diskussion	29
5.1 Ableitung der Aktivität laufender planetarer Wellen aus dem DAI	29
5.2 Vergleich laufender planetarer Wellen in der Stratosphäre und der Mesopause	34
5.3 Vergleich laufender planetarer Wellen in 30, 50, 70 und 90 km Höhe mit der Stratosphäre und der Mesopause	40
6 Zusammenfassung	42
Danksagung	45

Anhang	46
Literatur	62
Erklärung	66

Abkürzungsverzeichnis

ADEOS	Advanced Earth Observing Satellit
DAI	Dynamische Aktivitätsindex
DFD	Deutsche Fernerkundungsdatenzentrum
DLR	Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DU	Dobson Unit
FMI	Finnish Meteorological Institute
GOME	Global Ozone Monitoring Experiment
GOME-2	Global Ozone Monitoring Experiment-2
GRIPS	Ground-based Infrared P-branch Spectrometer
HA	Harmonische Analyse
MetOp-A	Meteorological Operational Satellite-A
MLTI	Mesosphäre und untere (lower) Thermosphäre/Ionosphäre
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDMC	Network for the Detection of Mesopause Change
NIVR	Netherlands Institute for Air and Space Development
OMI	Ozone Monitoring Instrument
QBO	Quasi-Biennale Oszillation
SABER	Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry
SCIAMACHY	Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography
TIMED	Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics
TOMS	Total Ozone Mapping Spectrometer

Abbildungsverzeichnis

2.1	Vertikalaufbau der Atmosphäre.	4
2.2	Schematische Darstellung einer planetaren Welle.	5
2.3	Darstellung der Verteilung der Land- und Wassermassen auf der Nord- und Südhemisphäre.	6
2.4	Skizzierte und stark abstrahierte Ozonverteilung ohne die Betrachtung des Effekts der planetaren Welle.	8
2.5	Skizzierte und stark abstrahierte Ozonverteilung unter Annahme der Existenz einer PW1.	8
2.6	Zeit-Höhenschnitt der Monatsmittel der mittleren zonalen Windkomponente in der tropischen Stratosphäre.	10
2.7	Monatlich gemittelte zonale Windströmung bei 25 km.	11
2.8	Schmetterlingsdiagramm: Verteilung der Sonnenflecken.	12
2.9	Schmetterlingsdiagramm: Verteilung der Sonnenflecken mit magnetischer Polung.	13
3.1	Abdeckung der Messung des Gesamtozons durch OMI.	16
3.2	Prozentualer Anteil der Breitenkreise die durch das 60%-Kriterium ausgeschlossen wurden.	21
3.3	Zeitreihe der dynamischen Aktivität.	21
4.1	Nyquist-Frequenz.	28
5.1	Darstellung des übergeordneten Verlaufs der DAI-Werte mithilfe der HA.	29
5.2	Darstellung des übergeordneten Verlaufs der DAI-Werte mithilfe des Splines.	30
5.3	Darstellung über mehrere Jahre, der jeweils für ein Jahr aufsummierten, absoluten Differenz zwischen DAI und Enttrendung für Spline und HA.	30
5.4	Darstellung des übergeordneten Verlaufs der DAI-Werte mithilfe des abschnittsweise enttrendeten Spline.	31
5.5	Veranschaulichung der DAI*-Werte für die Enttrendung mit verschiedenen Anzahlen an Stützstellen.	32
5.6	Die DAI*-Zeitreihe des kubischen Splines mit Fehlerbalken.	33
5.7	Die Zeitreihe des mesosphärischen DAI 1 & DAI 2.	34
5.8	Vergleich des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1.	35
5.9	Vergleich des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2.	36
5.10	Korrelationskoeffizienten des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1.	37
5.11	Korrelationskoeffizienten des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2.	37

5.12 Vergleich des um drei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1	38
5.13 Vergleich des um zwei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2	38
5.14 Zeitreihe der SABER-Daten für die einzelnen Höhen.	40
5.15 Vergleich der SABER-Daten mit dem DAI* der Ozondaten und dem mesosphärischen DAI 1	41
5.16 Vergleich der SABER-Daten mit dem DAI* der Ozondaten und dem mesosphärischen DAI 2	41
6.1 Die DAI*-Zeitreihe des kubischen Splines.	42
6.2 Zeitreihe der SABER-Daten für die einzelnen Höhen.	43
6.3 Die Zeitreihe des mesosphärischen DAI 1 & DAI 2	43

Tabellenverzeichnis

3.1	Anzahl an vorhandenen Datenpunkten der Ozonsensoren.	23
3.2	Anzahl an vorhandenen Datenpunkten des SABER-Instruments.	24

1 Einleitung

Die Fernerkundung ist eine im wissenschaftlichen Bereich weit verbreitete Einsatzmethode um Daten zu erfassen.

Der Beginn dieser Technik ist auf Mitte des 19. Jahrhunderts zurückzuführen. Damals nahm ein Fotograf von einem Heißluftballon Bilder von Paris auf. Gegen Ende des 19. Jahrhunderts wurden in Bayern Brieftauben mit Kleinkameras bestückt um Bilder von den überflogenen Gebiete zu erhalten. Im 20. Jahrhundert wurde durch die Erfindung des Flugzeugs die Aufnahme von Luftbildern erleichtert, jedoch war anfangs noch keine gezielte Fernerkundung möglich. Erst im ersten Weltkrieg wurde die Technik optimiert und es wurden strategisch wichtige Geländeabschnitte aufgenommen. Im zweiten Weltkrieg erfolgte eine systematische Fernerkundung mittels Erkundungsflügen. Weitere Entwicklungen fanden im Bereich der Bildtechnik statt und kamen ab 1960 in Flugzeugen zum Einsatz. Es wurden Infrarot-Kameras verwendet um einen Einblick in die Pflanzenwelt zu erhalten. Zudem wurden Scanner eingesetzt, die in verschiedenen Wellenlängen, Strahlungen des überflogenen Gebietes aufnahmen. Ab dem Jahr 1972 konnten durch die entstandene Raumfahrttechnologie erste Fernerkundungssensoren ins All befördert werden. Dies ermöglichte Daten des gesamten Erdballs zu erfassen. Heutzutage werden weiterentwickelte und neue Techniken genutzt um Informationen über die Erde zu gewinnen. [Historie]

Was bedeutet Fernerkundung?

Fernerkundung ist eine kontaktlose Erkundung der Erdoberfläche und der Atmosphäre, die mit Hilfe von Sensoren an Luft- und Raumfahrzeugen durchgeführt wird. Zur Informationsgewinnung wird elektromagnetische Strahlung genutzt. Diese Strahlung wird einerseits von passiven Systemen empfangen. Dabei wird natürliche Strahlung, die von der Erde ausgestrahlt oder an der Erdoberfläche (z.B. von der Sonne) reflektiert wird, aufgenommen. Ebenso kann diese Strahlung von Atomen/Molekülen in der Atmosphäre ausgesandt bzw. zurückgestreut werden. Zum anderen gibt es aktive Systeme, bei denen die empfangene Strahlung eigens (künstlich) erzeugt, ausgesandt und in der Atmosphäre oder an der Erdoberfläche reflektiert wird. Die gewonnenen Daten enthalten geometrische und physikalische Informationen der Erdoberfläche. Die geometrische Information beschreibt die räumliche Richtung aus der die Strahlung stammt. Bei der physikalischen Information spielen hauptsächlich die Intensität und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung eine Rolle. Das elektromagnetische Spektrum, welches in der Fernerkundung zur Verwendung kommt, liegt in einem Bereich von $0,1 \mu m$ bis zu $10 m$ Wellenlängen. In dem Bereich von $0,1 \mu m$ bis $0,4 \mu m$ wird die Strahlung als nahe ultraviolett bezeichnet. Im An-

schluss von $0,4 \mu m$ bis $0,7 \mu m$ befindet sich das sichtbare Licht. Der darauf folgende Bereich von $0,7 \mu m$ bis $300 \mu m$ wird Infrarot genannt. Hieran schließt der RadARBereich von $300 \mu m$ bis $25 m$ Wellenlänge, indem sich von $1 mm$ bis $10 cm$ die Mirkowellen befinden. [Fernerkundung]

Anwendungen der Fernerkundung finden u. a. in Bereichen der Kartographie, der Umwelt, der Wettervorhersage oder aber bei Katastrophen statt.

Für die vorliegende Arbeit wird die Fernerkundung jedoch für Prozesse in der Atmosphäre genutzt. Diese Prozesse der Atmosphäre basieren auf Vorgängen im Bereich Strahlung, Chemie und Dynamik. Eine dieser großräumigen Dynamiken in der Atmosphäre ist durch die planetaren Wellen geprägt.

Ziel dieser Arbeit ist es laufende planetare Wellen aus Ozon- und Temperaturdaten in der Stratosphäre, der Mesopause und dem sich dazwischen befindlichen Stockwerk abzuleiten und zu vergleichen. Die benötigten Daten wurden mithilfe von Fernerkundungs-Instrumenten (TOMS, OMI, GOME-2 und SABER) auf Satelliten erfasst. Einzig das GRIPS-Instrument beobachtet die Mesopause von der Erdoberfläche aus. Die verwendeten Wellenlängen der Ozonmessinstrumente liegen im Bereich von $240 - 800 nm$, die der Temperaturmessinstrumente im Bereich von $1,2 - 17,0 \mu m$.

Die Arbeit ist folgendermaßen strukturiert: Zunächst wird auf die für diese Arbeit relevanten physikalischen Grundlagen wie der Aufbau der Atmosphäre, die planetaren Wellen, die Quasi-Biennale-Oszillation, sowie die solare Aktivität näher eingegangen (Kapitel 2). Im Anschluss erfolgt ein Überblick der verwendeten Datengrundlagen (Kapitel 3) und Analyseverfahren (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden die Ergebnisse präsentiert, sowie diskutiert. Dieses Kapitel schließt mit dem Vergleich der Untersuchung der laufenden planetaren Wellen von der Stratosphäre bis hin zur Mesopause.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Aufbau der Atmosphäre

Die Atmosphäre der Erde kann einerseits anhand ihrer chemischen Zusammensetzung, andererseits durch ihren charakteristischen Temperaturverlauf gegliedert werden (siehe Abb. 2.1).

Chemischer Aufbau

Betrachtet man die Atmosphäre bezüglich ihrer chemischen Zusammensetzung, so werden zwei wesentliche Schichten erkennbar.

Zum einen die Homosphäre, in der das Verhältnis aus Stickstoff, Sauerstoff, Argon, Kohlenstoffdioxid und anderer Spurengase (z.B. Ozon) bis zu einer Höhe von ca. 100 km relativ konstant bleibt.

Zum anderen die Heterosphäre, in welcher der Vorgang der molekularen Entmischung beginnt, d.h. die vorkommenden Gase werden infolge ihres Gewichtes (von schwer in niedrigen Höhen, zu leicht in höheren Höhen) getrennt.

Der Übergang dieser Sphären wird als Turbo- oder Homopause bezeichnet. [Liljequist und Cehak, 1984]

Thermischer Aufbau

Üblicher ist es jedoch die Atmosphäre mittels ihrer kennzeichnenden Temperaturstruktur in fünf Bereiche zu gliedern.

Der Abschnitt von der Erdoberfläche bis ca. 10-12 km Höhe, in dem alle Wetterprozesse stattfinden, wird als Troposphäre bezeichnet. Sie ist physikalisch durch eine konstante Temperaturabnahme mit ansteigender Höhe gekennzeichnet.

Die Grenze zur nächsten Schicht ist die Tropopause. Sie erreicht in den Tropen eine Höhe von etwa 17-18 km, an den Polen lediglich eine Höhe von ca. 8 km. Dort befindet sich auch das erste Temperaturminimum, das bei ungefähr -60 °C liegt.

Die Stratosphäre schließt in dem Höhenbereich von etwa 12-50 km an. Bis ca. 20 km wird sie als untere Stratosphäre bezeichnet. Dort herrscht eine stetige Temperatur von etwa -56 °C. In der oberen Stratosphäre ist ein beständiger Temperaturanstieg zu verzeichnen, der sein Maximum bei ungefähr 0 °C und einer Höhe von ca. 40 km erreicht. Ebenfalls ist in der Stratosphäre eine signifikante Zunahme der Ozonkonzentration bis zu einer Höhe von etwa 30 km charakteristisch. Der angesprochene Anstieg der Temperatur ab ca. 20 km wird durch die Ozonschicht verursacht, da ultraviolette Strahlung absorbiert und durch einen chemischen Prozess Wärme erzeugt wird. Ohne diese Eigenschaft des Ozons wäre ein Leben auf der Erde nicht möglich. [Latif, 2009]

Ab einer Höhe von etwa 50 km bis zu 80 km folgt die Mesosphäre. Hier ist das zweite Temperaturminimum zu verzeichnen. Bei 80 km herrscht eine Temperatur von bis zu -100°C . Die nächste Schicht zwischen ca. 80-400 km ist die Thermosphäre. Dort können keine Temperaturen gemessen werden, sondern nur noch Strahlungsenergien. Die obere Mesosphäre/untere Thermosphäre (engl. mesosphere/lower thermosphere (MLT) region) von ca. 70-120 km wird zwischen 80 und 100 km als Mesopause bezeichnet, in der sich in einer Höhe von etwa 87 km die OH^{\star} -Schicht befindet. Diese wird auch Airglow genannt. Durch sie können in dieser Höhe Temperaturen gemessen werden, wie schon Meinel vor gut 60 Jahren erkannte. [Meinel, 1950 und Lange, 1982]

Die letzte Schicht wird durch die Exosphäre dargestellt, die bis zu einer Höhe von etwa 400-1000 km reicht. Da der Luftdruck in dieser Höhe minimal ist, herrscht annähernd ein Vakuum. [Latif, 2009]

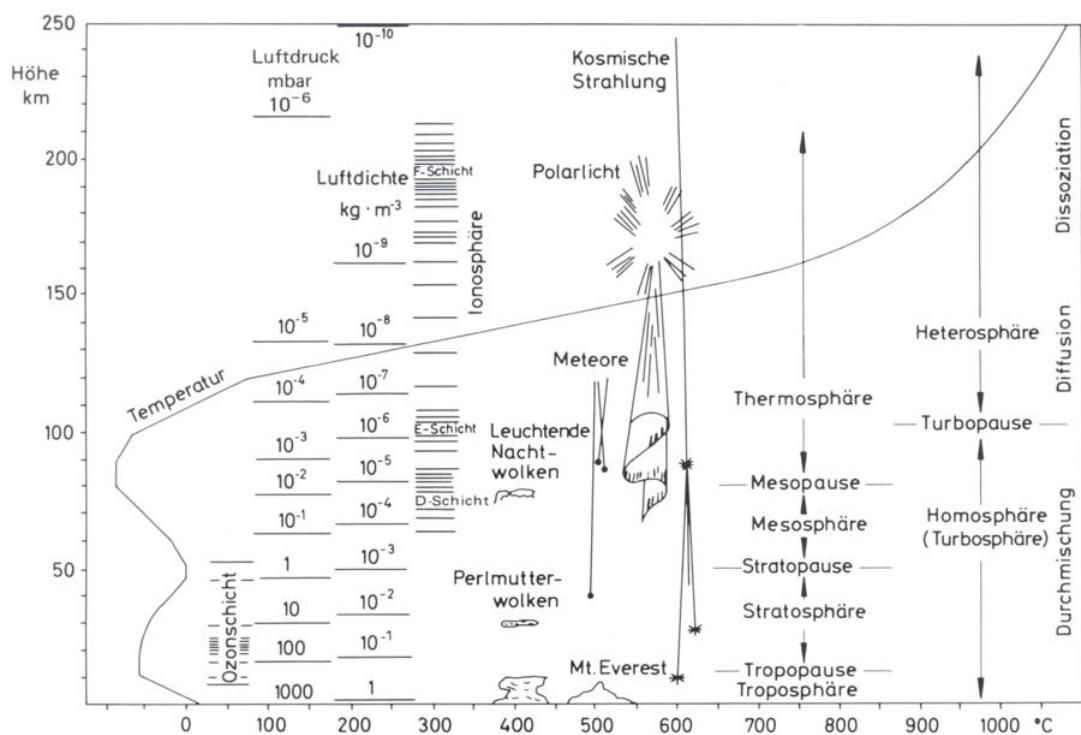


Abbildung 2.1: Vertikalaufbau der Atmosphäre. [Liljequist und Cehak (1984)]

2.2 Planetare Wellen

In der Erdatmosphäre treten drei Arten von periodischen Schwingungen auf. Zum einen Schallwellen, deren rücktreibende Kraft die Druckgradientenkraft ist. Zum anderen Schwerewellen, mit der Schwerkraft als Rückstellkraft und zuletzt die planetaren Wellen bzw. Rossby-Wellen, deren Entstehung unter anderem auf der Corioliskraft beruht.

Planetare Wellen sind weiträumige Wellenbewegungen in der Atmosphäre oder den Meeren. Sie entstehen, wenn eine hinreichend große meridionale (längengradparallele) Kraft ein Luftpaket auslenkt. Dies lässt sich vereinfacht wie folgt erklären. In einer barotropen divergenzfreien Atmosphäre gilt der Erhaltungssatz der absoluten Wirbelstärke η [Pilcher, 1986]:

$$\frac{d\eta}{dt} = 0. \quad (2.1)$$

Die absolute Wirbelstärke η setzt sich zusammen aus der Summe des vertikalen Anteils der relativen Wirbelstärke ζ und des Coriolisparameters $f = 2\Omega\sin\varphi$ (Ω = Winkelgeschwindigkeit der Erde; φ = geographische Breite). Bei ζ handelt es sich um einen lokalen Drehimpuls, bei f um einen globalen Drehimpuls.

$$\eta = \zeta + f \quad (2.2)$$

Wird ein Luftpaket meridional ausgelenkt, so ändert sich der Parameter φ und damit auch die Corioliskraft, die auf das Luftpaket wirkt. Dies wird durch eine Variation des lokalen Drehimpulses ζ ausgeglichen, weshalb sich das Luftpaket dreht und über seine ursprüngliche Ruhelage hinaus schwingt. Der Prozess wiederholt sich und es entsteht eine sinusförmige Bewegung (siehe Abb. 2.2).

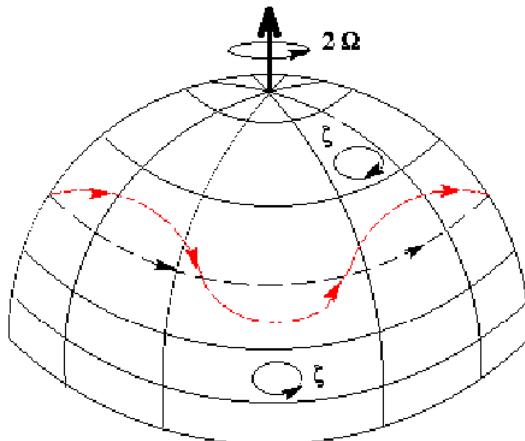


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung einer planetaren Welle. [Bittner, 2002]

Es gibt zwei unterschiedliche Arten planetarer Wellen: quasistationäre und laufende Wellen. Bei dem quasistationären Anteil der planetaren Wellen findet in erster Näherung relativ zur Erdoberfläche keine Veränderung der Phasenlage statt. Typische Wellenlängen liegen im Bereich von mehreren tausend bis einigen zehntausend Kilometern. Die planetare Welle mit zonaler Wellenzahl 1 (abgekürzt: PW1) verfügt entlang eines Breitenkreises über nur ein Maximum und ein Minimum; ihre Wellenlänge variiert damit abhängig von der Breite. Angeregt werden sie z.B. durch Land-See-Übergänge oder durch Gebirgsketten. Aufgrund der charakteristischen Verteilung der Landmassen auf der Nordhemisphäre und Südhemisphäre (siehe Abb. 2.3) zeigen quasistationäre planetare Wellen auf der Nordhalbkugel höhere Amplituden als auf der Südhalkugel.

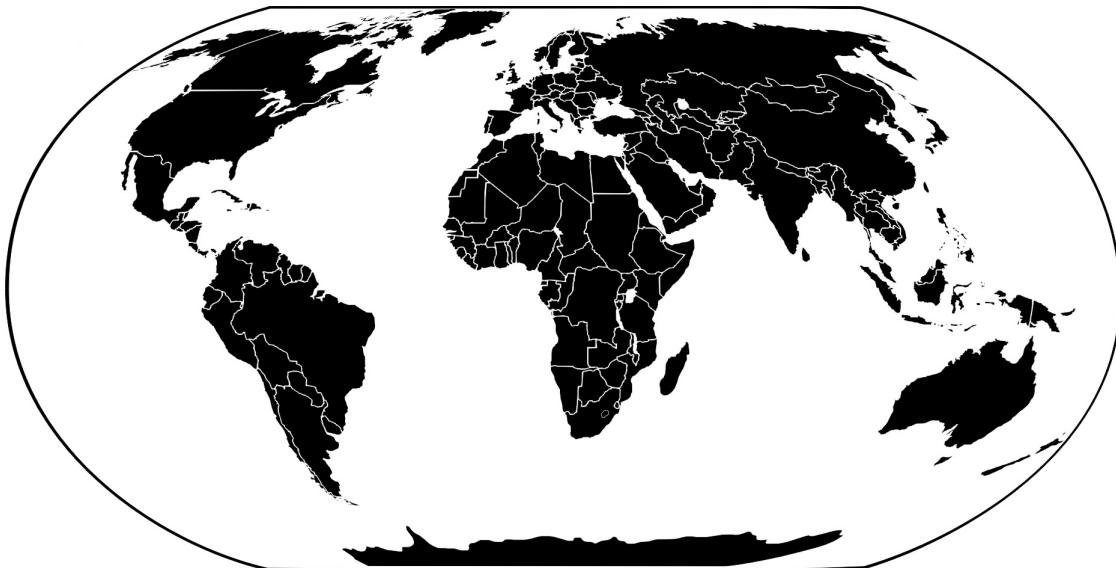


Abbildung 2.3: Darstellung der Verteilung der Land- und Wassermassen auf dem Globus. [Weltkarte]

Tritt eine Variation der Phasenlage im Hinblick auf die Erdoberfläche auf, so spricht man von laufenden planetaren Wellen. Diese haben ebenfalls Wellenlängen von mehreren tausend bzw. zehntausend Kilometern, Periodendauern von einigen Tagen und Amplituden von wenigen Kelvin [Andrews, 2010]. Laufende planetare Wellen sind somit schwächer ausgeprägt als quasistationäre planetare Wellen.

Bei bestimmten Bedingungen können sich planetare Wellen nicht nur horizontal, sondern auch vertikal ausbreiten.

Für die Berechnung der Phasengeschwindigkeit c im dreidimensionalen Raum gilt:

$$c = u_0 - \frac{\beta}{k^2 + l^2 + \frac{f_0^2}{N^2}(m^2 + E^2)} \quad (2.3)$$

(Herleitung siehe Pilcher, 1986), wobei u_0 der zonale (breitengradparallele) Grundstrom ist, $\beta := \frac{\partial f}{\partial y}$ die meridionale Änderung des Coriolisparameters, k, l und m die zonale, meridionale bzw. vertikale Wellenzahl, f_0 ein Anfangswert des Coriolisparameters, E der sog. Eckhardt-Koeffizient und N die Brunt-Väisälä-Frequenz ist.

Damit sich eine planetare Welle vertikal ausbreiten kann, muss - mathematisch betrachtet - ihre vertikale Wellenzahl m reell sein. Somit gilt:

$$\frac{\beta}{u_0 - c} > k^2 + l^2 + \frac{f_0^2}{N^2} E^2 \quad (2.4)$$

$$0 < u_0 - c < \frac{\beta}{k^2 + l^2 + \frac{f_0^2}{N^2} E^2} \quad (2.5)$$

Laufende planetare Wellen können sich infolgedessen nur ausbreiten, wenn $u_0 - c > 0$ ist. Dies bedeutet, dass eine Wellenbewegung westwärts zum zonalen Grundstrom erfolgt. Im speziellen Fall der quasistationären planetaren Wellen gilt $c = 0$. In diesem Fall muss Westwind (d.h. $u_0 > 0$) vorherrschen, damit eine vertikale Ausbreitung möglich ist.

Während in der Troposphäre das gesamte Jahr über ein Westwindregime vorliegt, ändert sich die Windrichtung zwischen etwa 20 km und 70 km abhängig von der Jahreszeit: im Winter herrscht Westwind, der Sommer ist durch Ostwind geprägt. Die Ausbreitung von planetaren Wellen in die Strato- und Mesosphäre ist daher nur im Winter möglich [Andrews, 2010].

Um planetare Wellen zu untersuchen, können sowohl Ozon(säulen)- als auch Temperaturmessungen verwendet werden.

Ozon besitzt eine breitenabhängige Verteilung (wenig in niederen Breiten, viel in mittleren Breiten) und hat in der unteren/mittleren Stratosphäre, in welcher sich auch sein vertikales Maximum befindet, eine Lebensdauer von mehreren Tagen bis zu einigen Wochen. Laufende planetare Wellen zeichnen sich - wie oben bereits erwähnt - durch Periodendauern aus, die ebenfalls im Bereich von Tagen liegen. Planetare Wellen - quasistationäre als auch laufende - bewirken einen meridionalen Transport von Luftmassen. Diese führen dazu, dass O₃-arme Luftmassen aus niedrigen Breiten in O₃-reichere, mittlere Breiten transportiert werden und umgekehrt. Aufgrund der vergleichsweise langen chemischen Stabilität von Ozon werden planetare Wellen somit in Ozondaten sichtbar (siehe Abb. 2.4 und 2.5). Dieses Phänomen ist ebenso in Temperaturdaten erkennbar. Globale Beobachtungen der Temperatur sind demzufolge ebenfalls für die Analyse planetarer Wellen geeignet. [Erbertseder et al., 2006 und Wüst und Bittner, 2011]

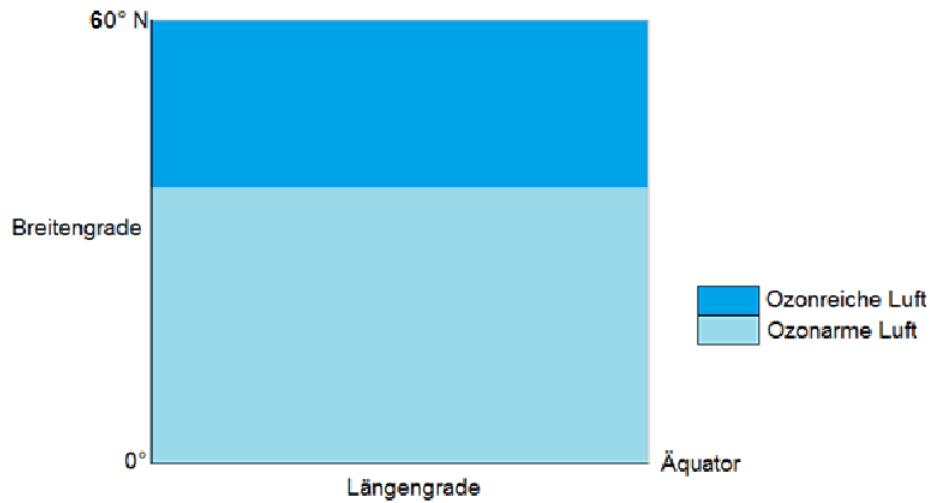


Abbildung 2.4: Skizzierte und stark abstrahierte Ozonverteilung ohne die Betrachtung des Effekts der planetaren Welle.

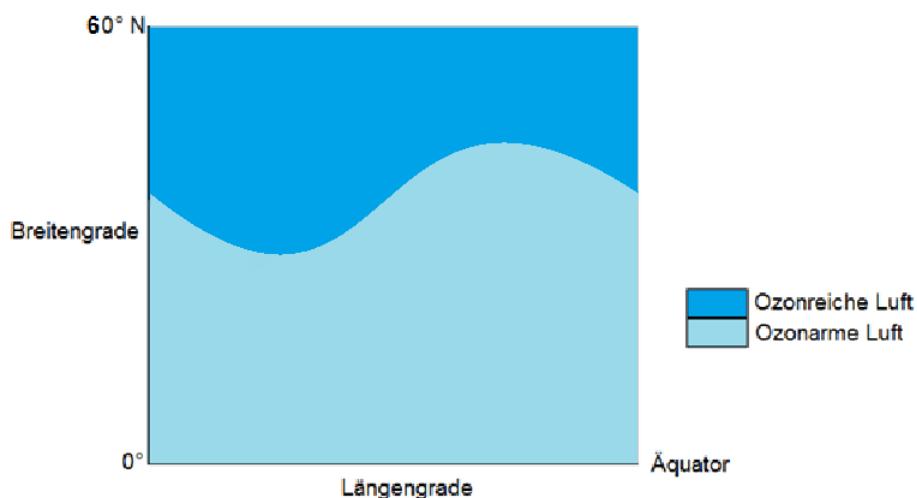


Abbildung 2.5: Skizzierte und stark abstrahierte Ozonverteilung unter Annahme der Existenz einer PW1.

2.3 Mehrjährige Oszillationen in der Atmosphäre

2.3.1 Quasi-Biennale Oszillation (QBO)

Ein Phänomen der mehrjährigen Oszillationen ist die annähernd zweijährige Schwingung (Quasi-Biennale Oszillation (QBO)), die sich von der Mesosphäre bis in die Stratosphäre ausbreitet. Die QBO ist eine Schwankung der mittleren zonalen tropischen Windströmung.

In Abbildung 2.5 ist der Zeit-Höhenschnitt der Monatsmittel der zonalen Windkomponente in der äquatorialen Stratosphäre abgebildet. Hieraus ist eine regelmäßige Umkehr der zonalen Strömung von Ost nach West bzw. West nach Ost zu erkennen. In einer Höhe von ca. 10hPa (~ 32 km) bis ca. 100hPa (~ 17 km) wechseln sich die Winde mit einer mittleren Periode von 28 Monaten ab. Abbildung 2.7 zeigt, dass die Periodizität jedoch schwanken kann.

Die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der jeweiligen Windphase beträgt ungefähr 1 km/Monat. Durch die Asymmetrie der Ost- und Westwindregime wird deutlich, dass letztere sich wesentlich schneller und häufiger durchsetzen. Die Ostwindphase ist in den oberen Schichten länger (\sim eineinhalb bis zwei Jahre) als die Westwindphase (\sim ein halbes Jahr bis ein Jahr). In den unteren Schichten ist dieses Verhalten entgegengesetzt. Die höchsten Windgeschwindigkeiten treten bei 15-20 hPa (~ 27 -30 km) auf, die mittleren Geschwindigkeiten der Ostwinde betragen 30 m/s, die der Westwinde 15 m/s. Ostwinde haben somit in allen Schichten eine stärkere Ausprägung als die Westwinde. Durch die Schwingung des zonalen Windes treten Temperaturschwankungen von bis zu 5 Kelvin auf. Eine Übersicht weiterer Merkmale der QBO wurde z.B. von Labitzke (1999) publiziert.

Die QBO beeinflusst nicht nur die tropische Stratosphäre, sondern ist auch in den mittleren Breiten und der polaren Atmosphäre festzustellen [Ruzmaikin et al., 2005]. Ebenso kommen Signaturen der QBO in der Mesosphäre vor [Naujokat, 2005].

Nach derzeitigem Wissensstand spielt die Wechselbeziehung zwischen zonalem Grundstrom und sich vertikal ausbreitenden tropischen Wellen für die Bildung der QBO eine wichtige Rolle. Jedoch sind noch nicht alle Einzelheiten der Entstehung der QBO vollständig erforscht, weshalb noch keine ausreichend genauen Simulationen der QBO erstellt werden können [Pascoe et al., 2005].

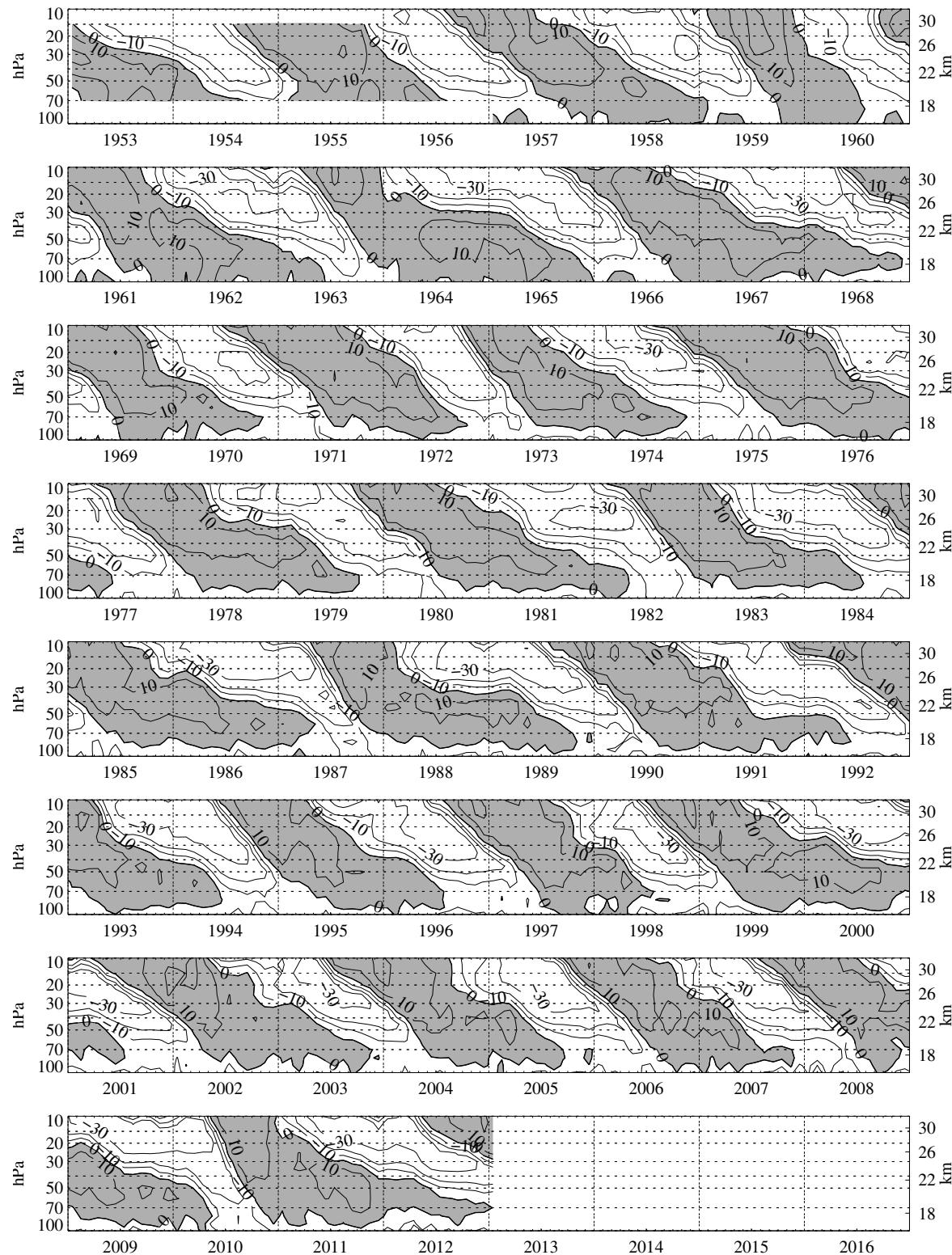


Abbildung 2.6: Zeit-Höhenschnitt der Monatsmittel der mittleren zonalen Windkomponente in m/s in der tropischen Stratosphäre. Negative Werte (weiß) stehen für Westwinde, positive Werte (grau) für Ostwinde. Daten von verschiedenen Stationen: Januar 1953 = August 1967 Canton Island (3S, 172W); September 1967 = Dezember 1975 Gan/Malediven (1S, 73E); seit Januar 1976 Singapur (1N, 104E). [FU-Berlin, (26.02.2013)]

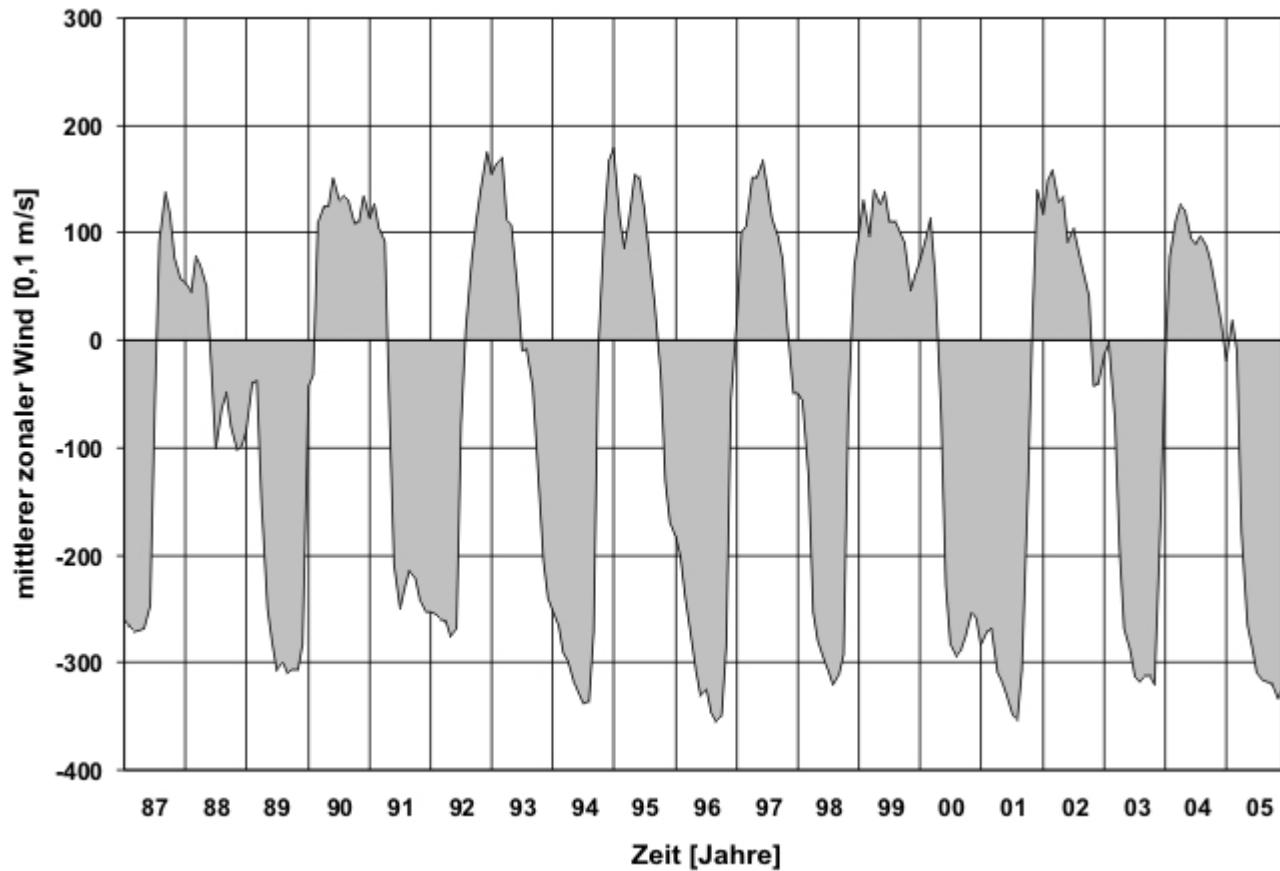


Abbildung 2.7: Monatlich gemittelte zonale Windströmung bei 30 hPa (~ 25 km) über Singapur (1°N , 104°O). Positive Werte stellen Westwinde dar, negative Werte Ostwinde (von Osten nach Westen). [Höppner, 2009]

2.3.2 Solarer Einfluss

Die Angabe der Sonnenvariabilität erfolgt auf differierenden Zeitskalen. Es gibt zum einen den 27-tägigen Zyklus, der durch die Rotation der Sonne um sich selbst entsteht. Zum anderen existieren aber auch langperiodische Zyklen, wie der 11-jährige Sonnenfleckencyklus, der 22-jährige Hale-Zyklus, bedingt durch das solare Magnetfeld, der weniger bekannte ca. 40-50-jährige Schövezyklus, der 75-90-jährige Gleissbergzyklus und der ebenfalls weniger bekannte 180-200-jährige Josezyklus. Eine Zusammenfassung der bekanntesten Sonnenzyklen findet man z.B. bei Moussas et al. (2005) und Schönwiese (2003).

Bei der Wiederholung der Häufigkeit von Sonnenflecken handelt es sich um den quasi 11-jährigen Zyklus (siehe Abb. 2.8). Diesen erkannte schon 1843 der Amateurastronom Heinrich Schwabe (Schwabe-Zyklus) [Labitzke, 1999].

Die Sonnenflecken sind eine bedeutende Charakteristik der Sonnenaktivität. Die Ausdehnungen der Flecken reichen von vergleichsweise „kleinen Poren“ mit 1000 km Durchmesser bis zu meh-

reren zehntausend Kilometer Durchmesser [Engelhardt, 1990]. Diese sind durch konventionelle Teleskope auf der Sonne als dunkle Flecken zu erkennen. Die Temperaturen dieser Flecken sind um ca. 2500 K niedriger als in der angrenzenden Photosphäre [Blome et al. (2002)]. Ihre Entstehung zu Beginn eines Zyklus ist in höheren Breiten bei ca. $+40^\circ$ und -40° spiegelbildlich zum Äquator. Dann bewegen sie sich mit Fortschreiten des Sonnenzyklus in Richtung des Äquators (siehe Abb. 2.8 (Bezeichnung: Schmetterlingsdiagramm)). Die zwei Hauptflecken haben eine entgegengesetzte magnetische Polarität (siehe Abb. 2.9). Anschließend bewegen sich die Sonnenflecken nicht zurück, sondern entstehen bei etwa $+40^\circ$ und -40° heliographischer Breite neu. Das Maß für die Sonnenfleckenhäufigkeit wird als Sonnenfleckenzahl bezeichnet (Details hierzu siehe Demtröder, 2005).

Neben Sonnenflecken treten auch Sonnenfackeln, Protuberanzen und Eruptionen auf. Diese Phänomene wiederholen sich alle bezüglich ihrer Intensität bzw. Häufigkeit in einem ca. elfjährigen Rhythmus [Blome et al., 2002]. Variationen zwischen acht und 15 Jahren sind jedoch nicht ungewöhnlich [Moussas et al., 2005].

DAILY SUNSPOT AREA AVERAGED OVER INDIVIDUAL SOLAR ROTATIONS

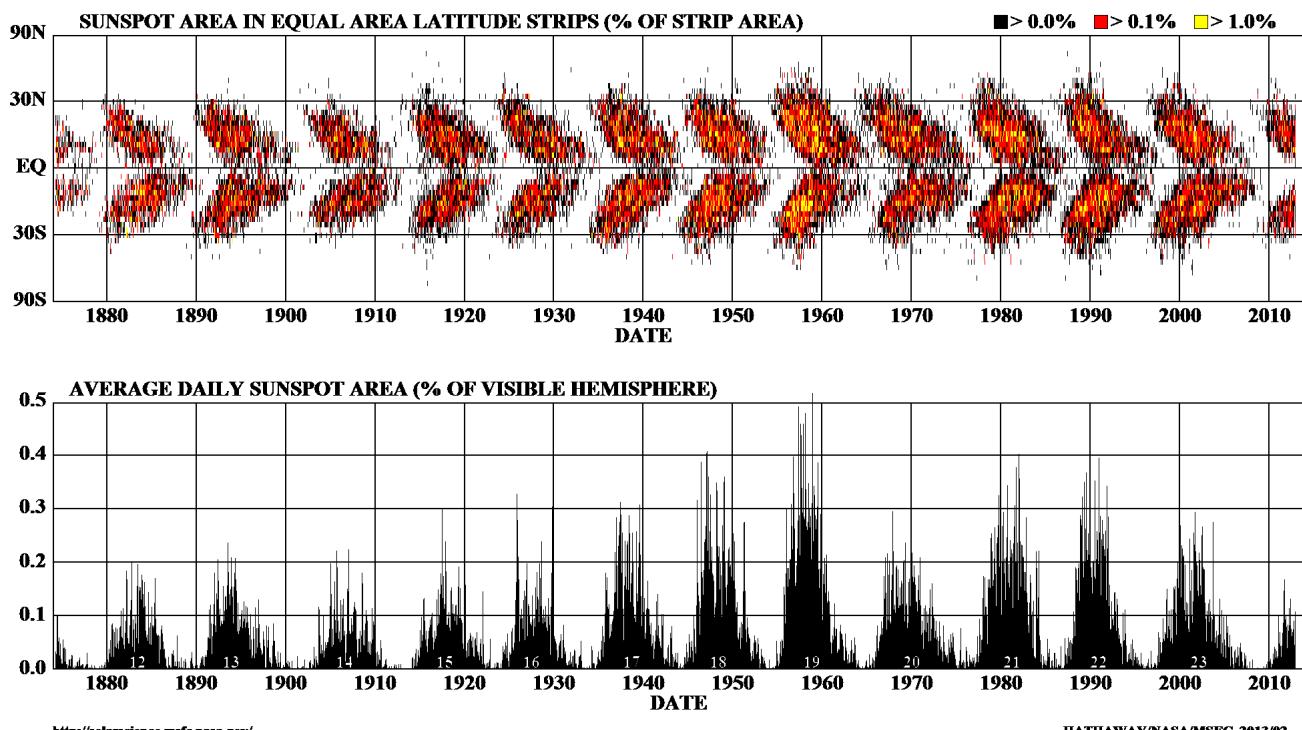


Abbildung 2.8: (oben) Häufigkeitsverteilung der Sonnenflecken nach heliographischer Breite in Abhängigkeit von der Zeit seit Mai 1874. Die Farben zeigen die prozentual von den Sonnenflecken bedeckten Flächen der sichtbaren Sonnenhemisphäre. (unten) Täglicher Mittelwert der bedeckten Fläche für den gleichen Zeitraum mit durchnummerierten Sonnenfleckenzyklen. [NASA-MSFC, (26.02.2013)]

Betrachtet man zusätzlich die Polarität der Hauptflecken (siehe Abb. 2.9), so wird deutlich, dass sich die gleiche magnetische Orientierung erst nach 22 Jahren wiederholt (Magnetfeldzyklus). Dies wird als Hale-Zyklus bezeichnet, benannt nach dem amerikanischen Astronom Georg Hale, der 1908 herausfand, dass Sonnenflecken magnetischen Felder aufweisen. [Höppner, 2009]

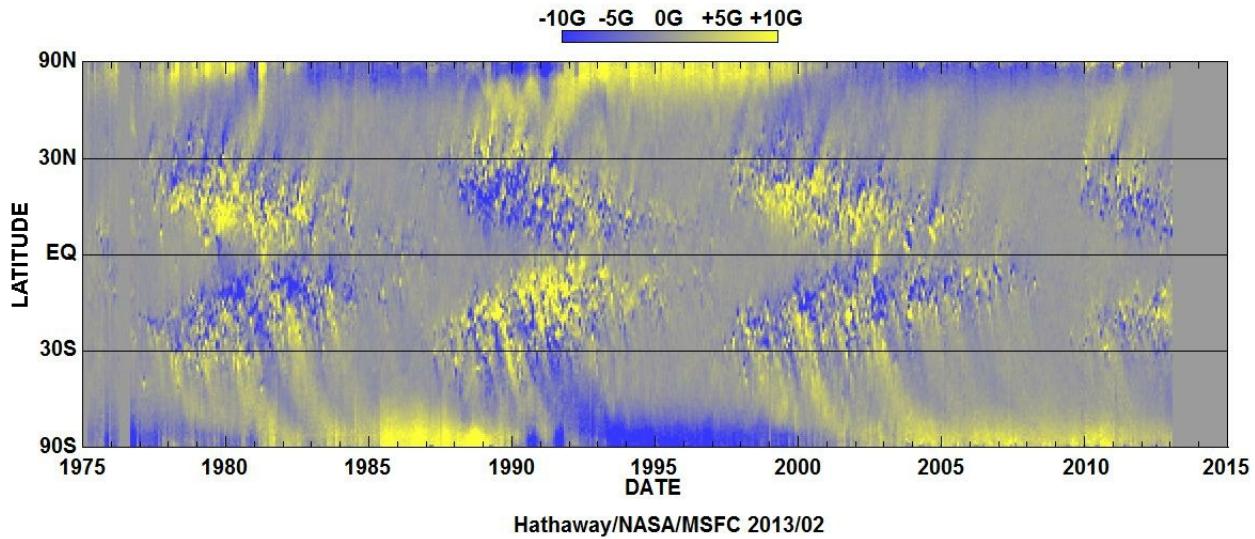


Abbildung 2.9: Verteilung der Sonnenflecken nach heliographischer Breite in Abhängigkeit von der Zeit seit 1875. Der Farbverlauf von Blau nach Gelb stellt die magnetische Polung von Süd nach Nord dar. [NASA-MSFC, (26.02.2013)]

3 Datengrundlage

Um planetare Wellen in der Atmosphäre näher zu untersuchen, eignen sich - wie bereits erwähnt - Ozon- und Temperaturdaten. In der vorliegenden Arbeit wurden einerseits Gesamtozondaten, der Messinstrumente Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS), Ozone Monitoring Instrument (OMI) und Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2) auf den Satelliten Nimbus-7, Meteor-3 und Earth Probe bzw. Aura und MetOp-A verwendet. Andererseits wurden Temperaturdaten der Instrumente SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) auf dem Satelliten TIMED und GRIPS (Ground-based Infrared P-branch Spectrometer) auf der Erde genutzt. Da die Ozonsicht und deren Ozonmoleküle in der unteren Stratosphäre eine Lebensdauer von einigen Monaten haben [Shepherd, 2007], eignen sich diese Daten optimal als konservatives Kontrastmittel um die Dynamik der planetaren Wellen in diesem Bereich nachvollziehen zu können. Sind die Eigenschaften der planetaren Wellen in Höhen über 30 km der Atmosphäre von Interesse, werden Temperaturdaten verwendet.

3.1 Ozon

3.1.1 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS)

Die amerikanische Luft- und Raumfahrtbehörde NASA (National Aeronautics and Space Administration) begann 1978 mit dem Forschungssatelliten Nimbus-7 die erste umfassende Beobachtung von Ozon. Das Erste sich an Bord eines Satelliten befindliche TOMS-Instrument lieferte von November 1978 bis Mai 1993 Ozondaten. Seitdem wurden die TOMS-Messgeräte auf drei weiteren Satelliten installiert. Zunächst auf dem russischen Satellit Metor-3, der von August 1991 bis Dezember 1994 Daten aufnahm. Anschließend wurde auf dem Satellit ADEOS ein drittes TOMS-Gerät mitgeführt. Dieses Gerät war von August 1996 bis Ende Juni 1997 in Betrieb. Das Nachfolge-TOMS-Gerät (Satellit Earth Probe) lieferte von Juli 1996 bis Dezember 2005 weitere Messungen zur Erde.

Ein ausführlicher Überblick der Satelliten-Missionen und der TOMS-Experimente ist im Internetauftritt der NASA [NASA-TOMS] zu finden.

Nimbus-7 flog mit einem sonnensynchronen Orbit auf einer polaren Umlaufbahn in einer Höhe von 955 km. Mit einem Abstand von 27° zwischen zwei aufeinanderfolgenden Äquatorübergängen erreichte er täglich 14-15 Streifenabdeckungen aufgrund der Erdumdrehung und einer Erdumkreisungsdauer von 104,15 Minuten. Dadurch wurde die Erde täglich fast komplett abgescannt. [Nimbus-7]

Der Satellit Meteor-3 aus der sowjetischen Serie konnte mit einer Flughöhe von ca. 1200 km, einem fast polaren Orbit und einer Umlaufzeit von 109 Minuten ebenfalls eine globale Abdeckung erzielen. [Meteor-3]

Als im Juni 1997 der ADEOS Satellit ausfiel, wurde die Umlaufhöhe des Satelliten Earth Probe von 500 km auf 740 km geändert, um eine größere Abdeckung zu erzielen. Dadurch entstand ein Gesamtozondatensatz von 1978 bis 2005 mit einer Datenlücke von weniger als zwei Jahren. Dieser Satellit hatte sowie Nimbus-7 eine polare, sonnensynchrone Umlaufbahn. [Earth-Probe] Das TOMS-Instrument, welches ein Ebert-Fastie-Spektrometer ist, besitzt ein festes Gitter und eine große Anzahl an Blenden. Durch diese konnte die zurückgestreute UV-Strahlung der Atmosphäre in Nadir-Richtung in sechs Wellenlängen (312,5 nm, 317,5 nm, 331,3 nm, 339,9 nm, 360,0 nm und 380,0 nm) gemessen werden. Zusätzlich wurde die einfallende Sonnenstrahlung registriert. Das Sichtfeld durch einen quer zur Flugrichtung abgelenkten Abtastspiegel betrug $3^\circ \times 3^\circ$. Es wurden alle 8 Sekunden 35 Messungen durchgeführt, sodass sich ein Beobachtungsbereich von 51° des Nadirs ergab. Die Datenerfassung im Umkreis der Pole, war während der Polarnachtperioden nicht möglich, da das Spektrometer nur bei Sonneneinstrahlung brauchbare Daten liefert. Die Ozonkonzentration kann durch das Verhältnis der spektralen Intensität, die von der Erde bzw. Atmosphäre zurückgestreuten UV-Strahlung zur einfallenden solaren Strahlung berechnet werden. Die Gitterung der TOMS-Ozondaten Level-3 beträgt $1,0^\circ$ geographische Breite mal $1,25^\circ$ geographische Länge. [Schneider, 2009]

3.1.2 Ozone Monitoring Instrument (OMI)

Eine Fortsetzung der Gesamtozondatenerfassung wurde mithilfe des Instrumentes OMI sichergestellt. Der Satellit Aura beförderte am 15. Juli 2004 das Gerät auf eine sonnensynchronen Umlaufbahn ins All. Aura befindet sich in ca. 700 km Höhe. Das Instrument OMI wurde als Nachfolgegerät für TOMS in Zusammenarbeit zwischen NIVR und FMI konzipiert. [Aura]

OMI gewährleistet mehrere Bestandteile der Atmosphäre, wie Wolkenparameter und bestimmte Aerosole, im Vergleich zum Vorgängermodell TOMS zu messen. Zudem ist die Fußpunktfläche von $13 \text{ km} \times 24 \text{ km}$ sehr genau bestimmt worden. Durch die Messungen werden Daten im Wellenlängenbereich von 264 nm bis 504 nm mit einer spektralen Auflösung von 0,42 nm bis 0,63 nm erfasst. Die Gitterung dieser Level-3 Daten liegt bei $0,25^\circ$ geographische Breite mal $0,25^\circ$ geographische Länge. Innerhalb eines Tages wird eine annähernd globale Abdeckung erreicht (siehe Abb. 3.1). [NASA-OMI(a)]

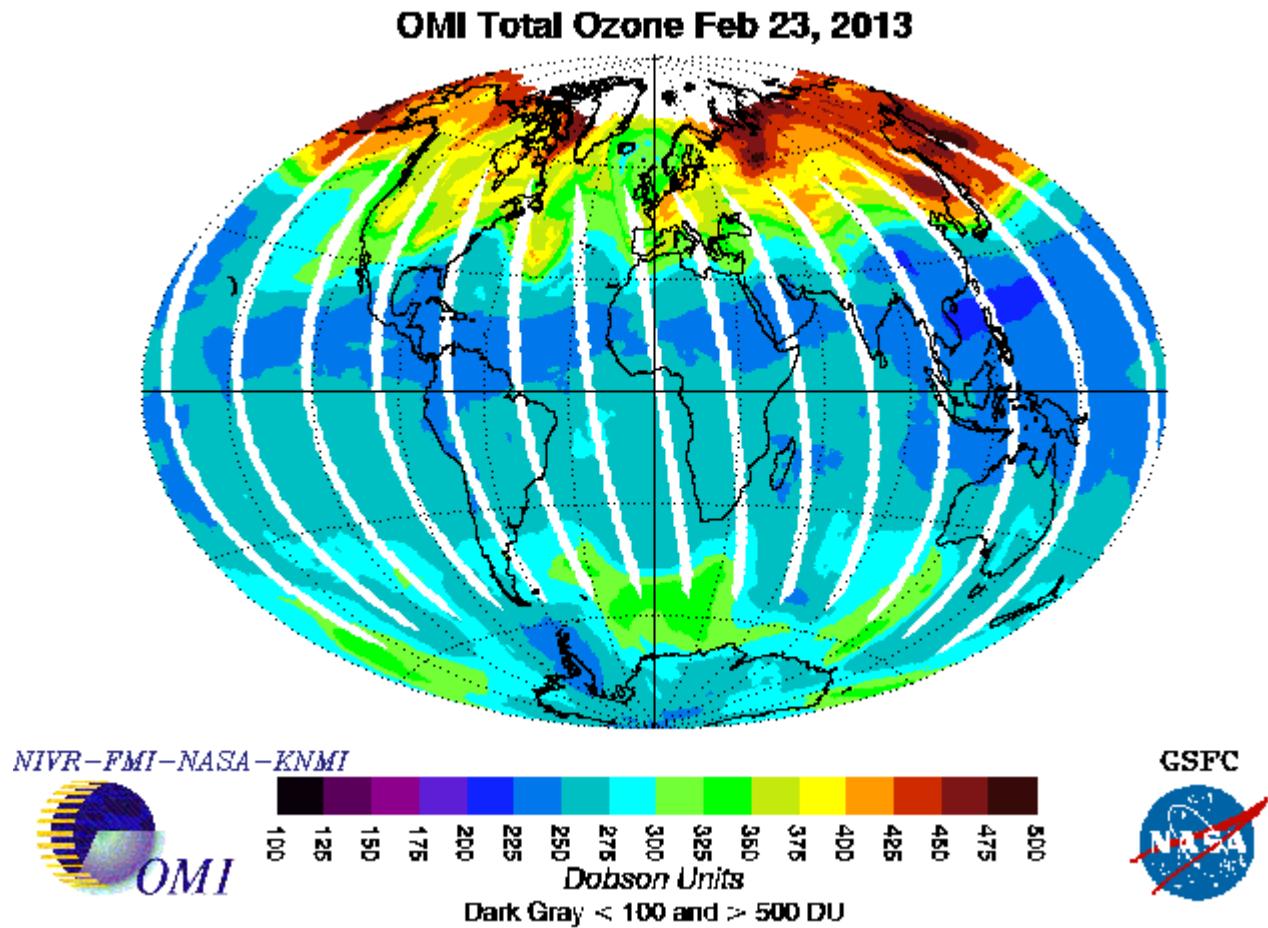


Abbildung 3.1: Abdeckung der Messung des Gesamtozons durch OMI auf dem Satelliten Aura (am 23.02.2013). [NASA-OMI(b)]

3.1.3 Global Ozone Monitoring Experiment-2 (GOME-2)

Anschließend wurde die Datenreihe des Gesamtozons mithilfe des Instruments GOME-2 auf dem Satellit MetOp-A fortgesetzt. Der Satellit startete am 19.10.2006 ins All. Dort wurde er in eine polare, sonnensynchrone Umlaufbahn von 817 km gebracht. Für eine Umlaufbahn der Erde benötigt er 101,3 Minuten und schafft 14,2 Orbits pro Tag. Der Wiederholungszyklus beträgt 29 Tage. [MetOp-A]

Die angefangene Langzeitbeobachtung der Spurengase in der Atmosphäre, die von GOME und SCIAMACHY begonnen wurde, wird jetzt von GOME-2 fortgeführt. Es erfasst Ozon, Stickstoffdioxid, Schwefeldioxid und weitere Spurengase. Darüber hinaus werden Eigenschaften von Wolken und Intensitäten der UV-Strahlung gemessen. Diese Daten werden zur Überwachung der Zusammensetzung der Atmosphäre und der Detektion von Schadstoffen verwendet. Durch GOME-2 soll eine weitere Überwachung der Atmosphäre für die nächsten 15 Jahre sichergestellt werden und ein Beitrag zur Verbesserung der Wettervorhersage, Atmosphärenchemieforschung

und Klimaüberwachung geleistet werden. Das Gerät ist in Flugrichtung montiert, ein Spiegel scannt eine Schneise der Erdoberfläche und leitet ankommendes Licht der Wellenlänge 240 - 800 nm in ein Teleskop. Das Licht wird durch eine Anzahl von Spiegeln geleitet, bevor es in Richtung eines Quarz-Prisma reflektiert wird, welches das ankommende Licht in vier Strahlen trennt. Die vier Strahlen werden weiter durch holographische Gitter geteilt um das Licht in 0,5 nm Wellenlängen (oder besser) aufzulösen. Ein Scannvorgang, der eine Breite von 1920 km abdeckt, benötigt nur 6 Sekunden. Während eines Tages kann somit eine komplette Abdeckung des Globus erfolgen. Die Auflösung der einzelnen Scans beträgt 80 km x 40 km pro Boden Pixel. [ESA/EUMETSAT-GOME-2]

3.2 Temperatur

3.2.1 Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry (SABER)

Um aus Temperaturdaten planetare Wellen zu extrahieren, werden Daten des Messinstruments SABER, das sich auf der Plattform TIMED befindet, verwendet. SABER ist vorwiegend dazu da, mehr über die Strahlungsbilanz der ausgehenden und eingehenden Energie in der oberen Atmosphäre zu erfahren. Es misst Infrarotstrahlung und emittierte Wärme fast über die vollständige Höhe der Atmosphäre und einen breiten Spektralbereich. Zusätzlich wird bestimmt, inwieweit sich die obere Atmosphäre durch die UV-Strahlung der Sonne erhitzt. Die Beobachtungen von SABER liefern neue Informationen über die Veränderung von Temperatur, Druck und die Dichte mit der Höhe. Außerdem werden die Bewegungen der Luft (Windstruktur) zwischen den Polen, von den unteren bis zu den höheren atmosphärischen Regionen, in den einzelnen Jahreszeiten (räumliche und zeitliche Schwankung) global aufgenommen. Im Laufe der Mission wird anhand der SABER-Daten eine Prognose bezüglich der Veränderungen über die Zeit in der Mesosphäre und unteren Thermosphäre/Ionosphäre (MLTI) möglich sein. Die TIMED-Mission (gestartet am 7.12.2001) hat das primäre Ziel, mehr über die bisher wenig erforschte Region der MLTI zu erfahren. Das seitlich in die Atmosphäre ausgerichtete Gerät deckt mit seinen Messungen einen Bereich von 60-180 km ab. Seine Umlaufbahn verläuft in 625 km Höhe. [NASA-SABER]

Für die vorliegende Arbeit wurden Daten in 30, 50, 70 und 90 km Höhe untersucht, wobei jeweils der nächstgelegene Datenpunkt zu diesen Werten verwendet wurde.

3.2.2 Ground-based Infrared P-branch Spectrometer (GRIPS)

GRIPS ist ein Infrarot-Spektrometer, welches von der Erdoberfläche aus das atmosphärische Luftleuchten in der Mesopause (80-100 km) misst. Das Luftleuchten entsteht in $87 \text{ km} \pm 4 \text{ km}$ aus einer chemischen Reaktion von Ozon (O_3) mit atomarem Wasserstoff (H).



D.h. Ozon (O_3) reagiert mit Wasserstoff (H) zu Sauerstoff (O_2) und Hydroxyl (OH^*). Die entstandenen angeregten Hydroxyl-Moleküle (OH^*) geben deren Energie in Form von sichtbarer und infraroter Strahlung ab. Unter der Annahme von thermodynamischen Gleichgewicht kann anhand der Vermessung bestimmter Rotations- und Vibrationsübergänge Rückschluss auf die kinetische Temperatur in $\sim 87 \text{ km}$ Höhe gezogen werden. Das GRIPS-Gerät nutzt hierfür den Spektralbereich zwischen 1,5 und 1,6 μm [Schmidt et al., 2013 und Lange, 1982]. Temperaturschwankungen in dieser Höhe lassen auf planetare Wellen schließen. Diese Messungen stellen

einen wichtigen Beitrag in der Erforschung des Klimawandels dar. Weltweit gibt es derzeit 50 Messstationen, die sich im sogenannten NDMC (Network for the Detection of Mesopause Change) zusammenschließen. Das NDMC ist eine globale Vereinigung mehrerer Forschungsgruppen, die durch gewonnene Daten in der Mesopausenregion die Früherkennung von Signalen des Klimawandels optimieren wollen. [NDMC-GRIPS]

3.3 Dynamischer Aktivitätsindex (DAI)

Der Dynamische Aktivitätsindex (DAI) ist ein Indikator für die weiträumige stratosphärische Dynamik. Dieser wird seit Juni 1996 am Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum (DFD) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) aus den Gesamtozondaten abgeleitet [Erbertseder et al., 2006 und Bittner und Dech, 1997]. Er reflektiert, getrennt für die Süd- und Nordhemisphäre, die Aktivität planetarer Wellen in der Stratosphäre und basiert auf der Tatsache, dass Ozon im Bereich der unteren/mittleren Stratosphäre als sogenannter konservativer dynamischer Tracer gilt. D.h. Ozon ist langlebig genug, um Bewegungsvorgänge von vier bis 20 Tagen darstellen bzw. nachvollziehen zu können.

Die Ausgangsdatei beschreibt pro Tag die Ozonverteilung über den gesamten Erdball und wird auf 1° Breite und $1,25^{\circ}$ Länge gegittert und spektral analysiert. Die folgende Berechnung des täglichen DAI kann nur für Breitenkreise durchgeführt werden, die mehr als 60% an Datenpunkten aufweisen. In Abbildung 3.2 wird ersichtlich, an welchen Breitenkreisen das 60%-Kriterium am häufigsten Anwendung fand. Aufgrund der vielen Ausschlüsse in den höheren Breiten wird der DAI lediglich von 50° Nord bis 50° Süd erstellt. Durch die Gitterung und die spektrale Analyse erhält man Kenntnis über die Amplituden der verschiedenen Wellen entlang der Breitenkreise. Anschließend wird der tägliche DAI getrennt für jede Hemisphäre entsprechend der 360° -, 180° -, und 120° -Schwingungen als durchschnittliche Amplitude, nach der Methode der Harmonischen Analyse, berechnet. Die Amplituden der ermittelten Schwingungen entsprechen einer Abschätzung der Amplituden der quasistationären planetaren Welle eins, zwei und drei. [Kramer, R.; persönliche Kommunikation]

Die Einheit des DAI lautet Dobson Unit (DU) und ist ein Maß für die Dicke der Ozonschicht. Die Zeitreihe der dynamischen Aktivität zeigt einen ausgeprägten Jahresgang mit einem Maximum im Winter und einem Minimum im Sommer (siehe Abb. 3.3). Dies ist aufgrund der Charakteristik, dass planetare Wellen sich nur bei mäßigen Westwinden vertikal ausbreiten können, (Kapitel 2.2) zu erwarten. Die Variationen des DAI im Bereich von Tagen weisen auf laufende planetare Wellen hin.

Die Algorithmen des DAI wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ebenfalls auf SABER-Daten angewandt. Der DAI - wie oben beschrieben und auf Ozondaten bezogen - wurde bereitgestellt.

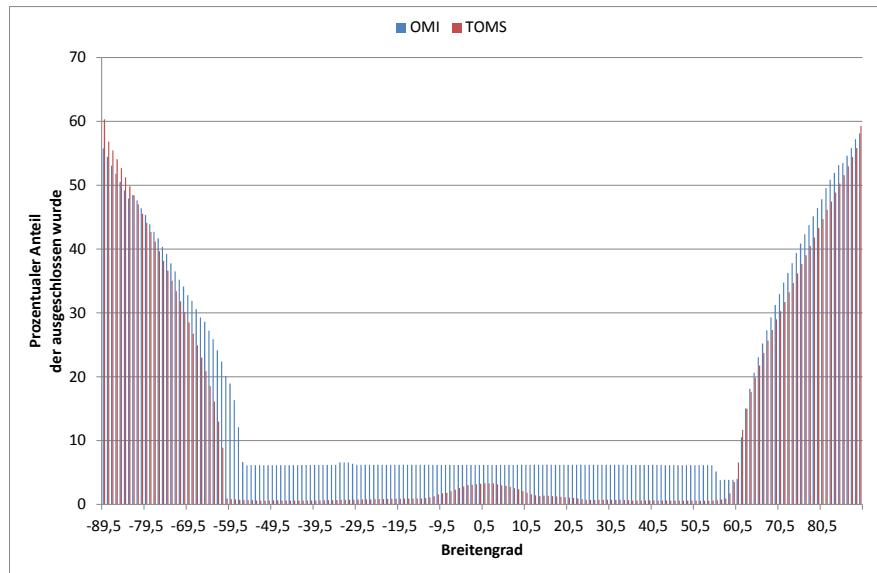


Abbildung 3.2: Prozentualer Anteil der Breitenkreise die durch das 60%-Kriterium, über die komplette Zeitreihe von TOMS und OMI, ausgeschlossen wurden. [Kramer, R.; persönliche Kommunikation]

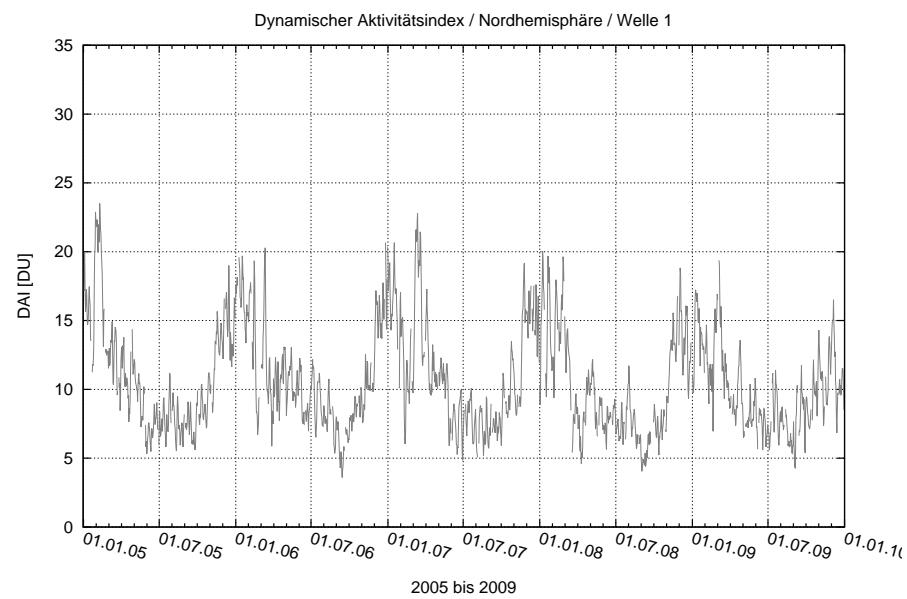


Abbildung 3.3: Die Zeitreihe der dynamischen Aktivität mit dem für sie charakteristischen Jahresgang.

In den folgenden beiden Tabellen 3.1 und 3.2 werden die Datenlücken bzw. vorhandenen Datenpunkten für die Ozonsensoren und das SABER-Instrument ersichtlich. Datenlücken liegen dann vor, wenn an einem Tag kein DAI abgeleitet werden konnte. Die genauen Zeiträume der Datenlücken werden im Anhang unter A1 und A2 aufgeführt. In den SABER-Daten wurden einige Werte als Ausreißer detektiert, welche in den Datenreihen durch Null ersetzt wurden. Eine Auflistung dieser Werte befindet sich ebenfalls im Anhang unter A3.

Tabelle 3.1: Anzahl an Datenlücken (Tage) bzw. vorhandenen Datenpunkten (Tage) der Ozonsensoren pro Jahr.

Jahr	Datenlücken	vorhandene Daten
1979	42	323
1980	4	362
1981	1	364
1982	1	364
1983	0	365
1984	1	365
1985	1	364
1986	2	363
1987	0	365
1988	0	366
1989	1	364
1990	0	365
1991	1	364
1992	0	366
1993	76	289
1994	143	222
1995	365	0
1996	206	160
1997	13	352
1998	22	343
1999	4	361
2000	0	366
2001	1	364
2002	11	354
2003	15	350
2004	9	357
2005	22	343
2006	21	344
2007	23	342
2008	28	338
2009	22	343
2010	37	328
2011	24	341
2012	59	307

Tabelle 3.2: Anzahl an Datenlücken (Tage) bzw. vorhandenen Datenpunkten (Tage) der jeweiligen Jahre für die einzelnen Höhen des SABER-Instruments.

Höhe	Jahr	Datenlücken	vorhandene Daten	Höhe	Jahr	Datenlücken	vorhandene Daten
------	------	-------------	------------------	------	------	-------------	------------------

30 km				50 km			
	2002	35	330		2002	34	331
	2003	10	355		2003	10	355
	2004	8	358		2004	8	358
	2005	7	358		2005	6	359
	2006	6	359		2006	6	359
	2007	2	363		2007	2	363
	2008	12	354		2008	12	354
	2009	9	356		2009	9	356
	2010	3	362		2010	3	362
	2011	1	364		2011	1	364
	2012	2	364		2012	2	364

70 km				90 km			
	2002	35	330		2002	36	330
	2003	10	355		2003	10	355
	2004	8	358		2004	8	358
	2005	7	358		2005	7	358
	2006	6	359		2006	6	359
	2007	2	363		2007	3	362
	2008	12	354		2008	12	354
	2009	9	356		2009	9	356
	2010	3	362		2010	3	362
	2011	1	364		2011	1	364
	2012	2	364		2012	2	364

4 Analyseverfahren

Ziel dieser Arbeit ist die Analyse laufender planetarer Wellen basierend auf DAI-Daten. Wie bereits erwähnt, sind die Signale laufender planetarer Wellen den wesentlich stärkeren Signalen der quasistationären planetaren Welle überlagert. Diese weisen zudem einen deutlichen Jahresgang auf. Um die Signaturen laufender planetarer Wellen zu analysieren muss dieser Jahresgang aus dem DAI-Datensatz extrahiert d.h. berechnet und subtrahiert werden. Diese sogenannte Enttrendung fand zum einen mit der Harmonischen Analyse (HA) statt, zum anderen mit einem kubischen Spline. Beide Verfahren werden im Folgenden kurz vorgestellt. Die Informationen hierzu sind von Wüst (2005) entnommen.

4.1 Harmonische Analyse (HA)

Mithilfe der harmonischen Analyse werden an einen Datensatz nach der Methode der kleinsten Quadrate Sinusfunktionen bestmöglich angepasst.

Wird von einer Zeitreihe y_t mit dem zeitlichen Abstand d , der Dauer T und den äquidistanten Messwerten y_1, \dots, y_N ausgegangen, so können keine Schwingungen mit einer Periodendauer größer als $\tau_{max} = 2T$ angepasst werden. Durch die sogenannte Nyquist-Frequenz $f_{Nyquist} = \frac{1}{2d}$ ist die minimale Dauer der Periode festgelegt: $\tau_{min} = 2d$. Daraus folgt, dass die Periodendauern der anzupassenden Schwingungen im Intervall $[\tau_{min}, \tau_{max}]$ liegen.

Zu Beginn des sogenannten Einzelschrittverfahrens muss festgelegt werden, welche Anzahl M an äquidistanten Stützstellen in diesem Intervall verwendet wird. Aus den gewählten Stützstellen folgen die in der Menge $\Lambda = \tau_{min}, \tau_{min} + \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{M+1}, \tau_{min} + 2\frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{M+1}, \dots, \tau_{max}$ liegenden, anzupassenden Periodendauern. Mithilfe des Newton-Raphson-Verfahrens [Freund und Hoppe, 1990] wird über die Methode der minimalen Summe der quadratischen Abweichungen

$$\min_{A_i \in \mathbb{R}, \varphi_i \in \mathbb{R}} \sum_{l=1}^N |y_l - A_i \cos\left(\frac{2\pi}{T_j}(l-1)d - \varphi_i\right)|^2 \quad (4.1)$$

die bestmögliche Kombination der Amplitude A_j* und der Phase φ_j* für jedes $T_j \in \Lambda, j=1, \dots, M+2$ ermittelt.

Die Güte YIS_j der Anpassung wird mit

$$YIS_j = 1 - \frac{\sigma_j^2}{\sigma^2} \quad (4.2)$$

bestimmt, wobei σ^2 die geschätzte Varianz der Zeitreihe ist und σ_j^2 mit

$$\sigma_j^2 = \sum_{l=1}^N \left(y_l - A_i^* \cos \left(\frac{2\pi}{T_j^*} (l-1)d - \varphi_i^* \right) \right)^2 \quad (4.3)$$

berechnet wird.

Die Periodendauer mit der höchsten Güte wird durch ein neues Intervall umschlossen und präziser untergliedert. Durch dieses Mittel verbessert sich die Genauigkeit von Periodendauer, Amplitude und Phasenverschiebung. Anschließend wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate iterativ durchgeführt, bis die Änderung der Güte von einem Schritt zum nächsten kleiner als ein festgelegter Wert ist. Nun werden die Residuen mit den optimalen Parametern (A_i^* , T_i^* und φ_i^*) berechnet:

$$res(l) = y_l - A_i^* \cos \left(\frac{2\pi}{T_i^*} (l-1)d - \varphi_{i1}^* \right), \quad l = 1, \dots, N. \quad (4.4)$$

Diese werden im Folgenden weiter analysiert.

4.2 Spline

Das Ziel ist es mithilfe der Splinetheorie eine einfach beschreibbare Funktion ϕ zu finden und diese mit Messwerten einer unbekannten konstanten Funktion f nachzubilden. Eine einfache Variante stellt die Beschreibung der Messwerte über die Polynominterpolation dar. Jedoch besitzt diese Methode gegenüber den Splinefunktionen eine schlechtere Konvergenzeigenschaft. Die kubischen Splines s werden mit äquidistanten Stützstellen berechnet. Die Zerlegung des Intervalls $[a, b]$ sei:

$$\Delta : a := b_1 < b_2 < \dots < b_N =: b. \quad (4.5)$$

Der kubische Spline s ist in jedem Teilintervall $[b_i, b_{i+1}], i=1,2,\dots,N-1$ ein Polynom dritten Grades und somit durch $4(N-1)$ Parameter bestimmt. Durch die Anforderung, dass s in dem Intervall stetig differenzierbar sein soll, werden drei Bedingungen an jeden inneren Knoten $b_i, i=2,3,\dots,N-1$ gestellt. Hier muss gelten:

$$s^{(j)}(b_i-0) = s^{(j)}(b_i+0), \quad j = 0, 1, 2. \quad (4.6)$$

Demzufolge verfügt der kubische Spline s über $4(N-1)-3(N-2) = N+2$ Freiheitsgrade. Daher ist s eindeutig durch

$$s(x) = \sum_{j=1}^{N+2} c_j q_j(x). \quad (4.7)$$

bestimmt. Indessen sind $q_j, j=1,\dots,N+2$ die Spline-Basisfunktionen. In Knabner (1998) wird eine geeignete Basis beschrieben.

Die Menge der Messdaten sei mit $\{(x_i, y_i) : x_i \in [a, b], i=1,\dots,m\}$ gegeben; A bezeichnet die folgende $m \times (N+2)$ -Matrix:

$$A = \begin{pmatrix} q_1(x_1) & q_2(x_1) & \cdots & q_{N+2}(x_1) \\ q_1(x_2) & q_2(x_2) & \cdots & q_{N+2}(x_2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ q_1(x_m) & \cdots & \cdots & q_{N+2}(x_m) \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

Zudem ist der Vektor der Koeffizienten $c = (c_j), j=1,\dots,N+2$ gegeben und der Vektor der Messwerte $y = (y_i), i=1,\dots,m$. Für die optimale Anpassung des Splines an die Messwerte wird von der „Methode der kleinsten Quadrate“ Gebrauch gemacht ($\min_{c \in \mathbb{R}^{N+2}} \|Ac - y\|^2$). Soll jedes y_i erfasst werden, wird $m = N + 2$ gewählt. Um nun jeden Messwert y_i wiederzugeben, benötigt man somit $N = m - 2$ Stützstellen. Soll jedoch eine Glättung eintreten, muss $m > N + 2$

sein [Bittner, 1993]. Die Schwierigkeit besteht nun darin, für die zu erreichende Glättung eine geeignete Stützstellenanzahl zu finden. Je mehr Stützstellen verwendet werden (bis maximal $m = N + 2$), desto besser wird die zu approximierende Kurve nachgebildet und desto weniger wird sie geglättet. Der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Stützstellen und der durch den Spline dargestellten minimalen Periodendauer ist der Folgende:

$$\lambda_{min} = 2d \quad (4.9)$$

wobei d der Abstand zwischen zwei Stützstellen ist. Das Kehrprodukt dieses Wertes wird Nyquist-Frequenz genannt (siehe Abb. 4.1).

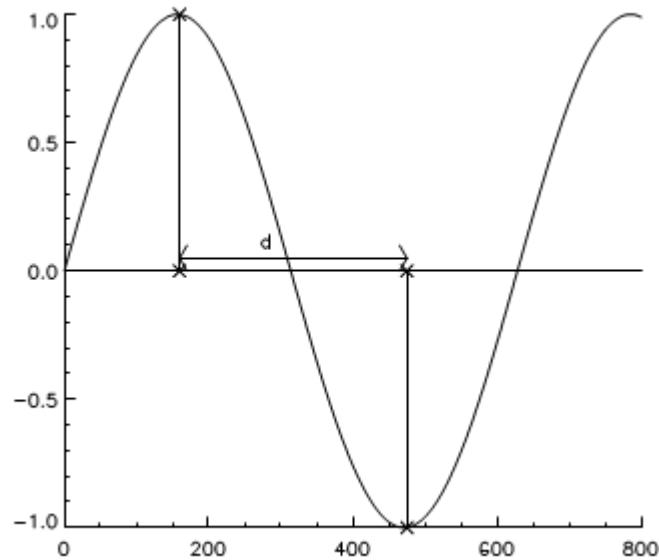


Figure 4.1: Nyquist-Frequenz. [Wüst, 2005]

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Ableitung der Aktivität laufender planetarer Wellen aus dem DAI

Die DAI-Daten können - wie eben vorgestellt - durch verschiedene Verfahren enttrendet werden, um den Anteil laufender planetarer Wellen zu extrahieren. In den folgenden Abbildungen werden die zwei verwendeten Methoden (HA und Spline) dargestellt. Abbildung 5.1 zeigt exemplarisch die Enttrendung des DAI (PW1, NH, 2006) mit der HA durch 3 Schwingungen mit Periodendauern im Bereich von 100 bis 365/366 Tagen (Stützstellen: 100). In Abbildung 5.2 wurde die Analyse mithilfe des kubischen Splines mit sechs Stützstellen durchgeführt. Dies entspricht einer minimalen Periodendauer von 104 Tagen.

In beiden Fällen ähneln sich die angepassten Kurven (schwarz) sehr stark. Um einen umfassenden Überblick zu erhalten, ist in Abbildung 5.3 die für jeweils ein Jahr aufsummierte, absolute Differenz zwischen DAI und Enttrendung, geteilt durch die Anzahl an vorhandenen Datenpunkten, für beide Enttrendungsmethoden und mehrere Jahre dargestellt. Die Unterschiede zwischen beiden Kurven sind als gering zu beurteilen. Einzig im Jahr 2010 beträgt der Unterschied 20-30 %.

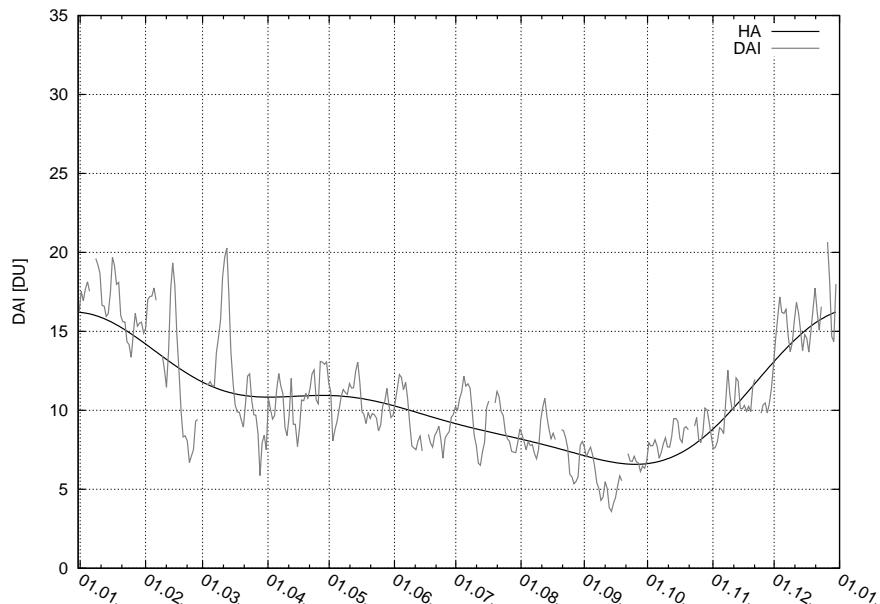


Abbildung 5.1: Darstellung des übergeordneten Verlaufs (schwarz) der DAI-Werte (PW1, NH, 2006) (grau) mithilfe der HA.

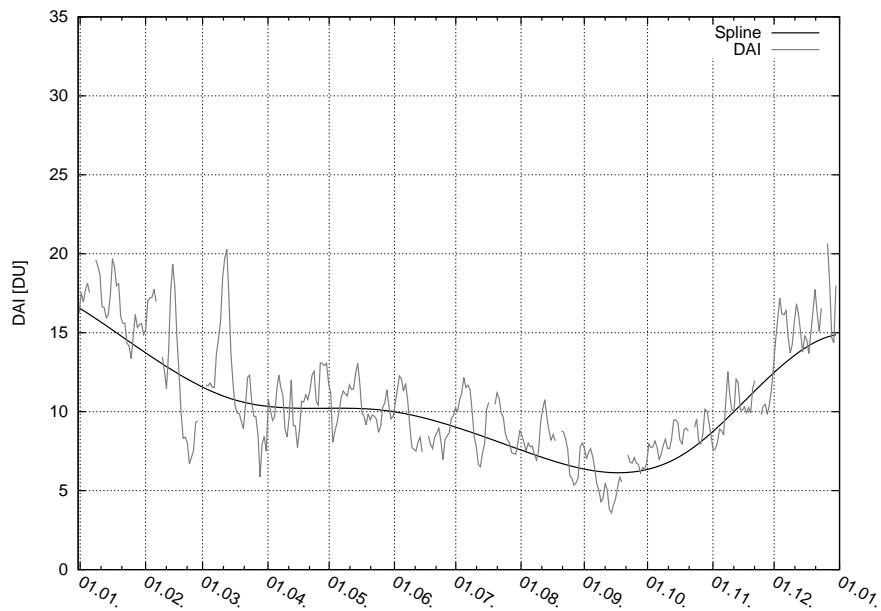


Abbildung 5.2: Darstellung des übergeordneten Verlaufs (schwarz) der DAI-Werte (PW1, NH, 2006) (grau) mithilfe des Splines.

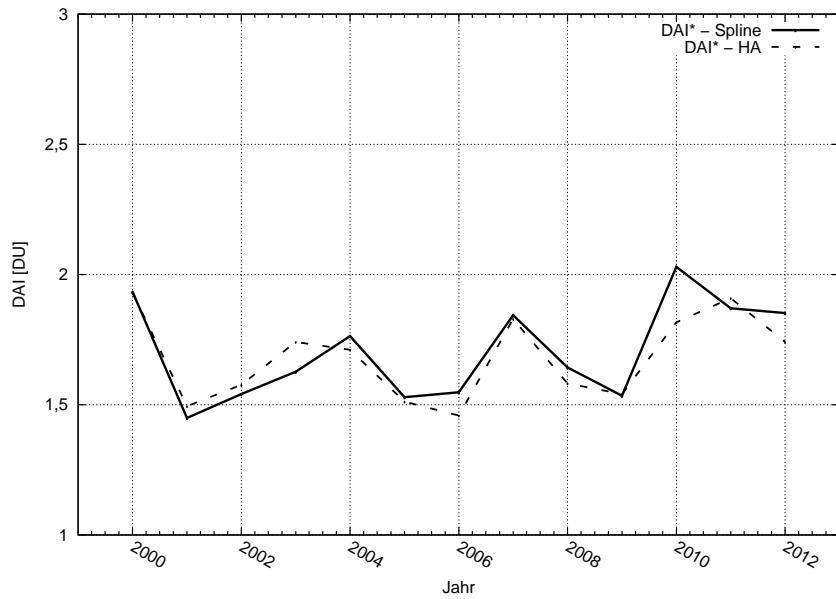


Abbildung 5.3: Darstellung über mehrere Jahre, der jeweils für ein Jahr aufsummierten, absoluten Differenz zwischen DAI und Enttrendung für Spline (durchgezogen) und HA (gestrichelt).

Die Güte der Anpassung der harmonischen Analyse und des kubischen Splines ist im Allgemeinen sehr gut. Im Jahr 2006 beträgt die Güte der Anpassung der HA $\sim 40\%$. Für die Jahre 2000 bis 2012 schwankt sie zwischen etwa 35 % und 65 % (Die exakten Werte von 2000-2012 befinden sich im Anhang unter A4). Durch die Ähnlichkeit der HA und des kubischen Splines kann man somit davon ausgehen, dass die Güte der Anpassung des Splines etwa im gleichen Bereich liegt.

Eine Herausforderung bei der Anpassung von verschiedenen Funktionen an den DAI stellt der Umgang mit Datenlücken dar. Kleinere Lücken im Bereich von wenigen Tagen sind hierbei kein Problem (siehe Abb. 5.1 und Abb. 5.2); dies gilt nicht für Datenlücken im Bereich von Wochen. Hier muss jeder Abschnitt einzeln enttrendet werden (siehe Abb. 5.4), da die Verfahren sonst zum Teil künstliche Schwingungen einführen. Tabelle A1 im Anhang zeigt eine Übersicht über Lage und Größe der Datenlücken pro Jahr. Die Zeitreihe hat in den Jahren 1993, 1994 und 1996 größere Datenlücken. Die Bereiche mit Datenpunkten wurden abschnittsweise mit dem kubischen Spline und zwei Stützstellen berechnet. Die minimalen Periodendauern sind hier abhängig von der jeweiligen Anzahl an vorhandenen Datenpunkten.

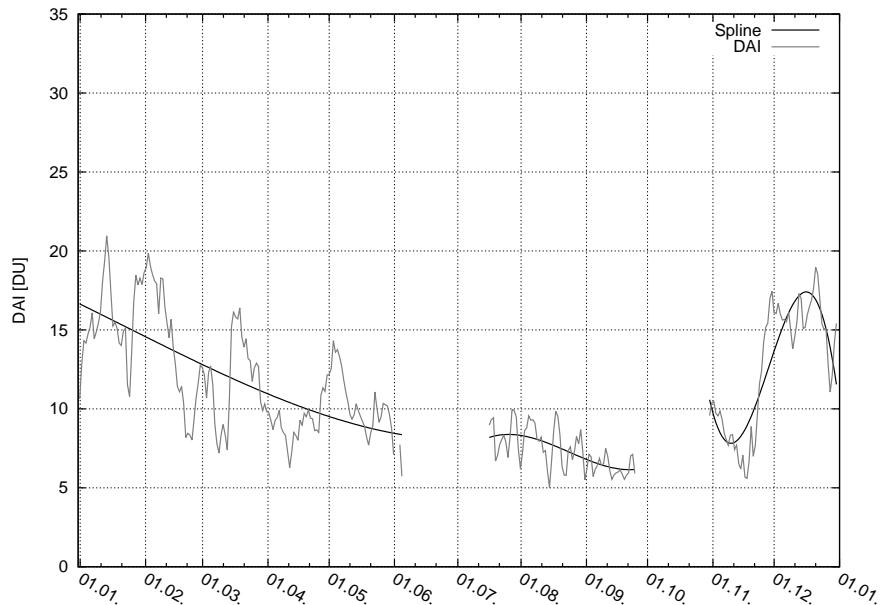


Abbildung 5.4: Darstellung des übergeordneten Verlaufs der DAI-Werte (PW1, NH, 1993) (grau) mithilfe des abschnittsweise enttrendeten Splines (schwarz).

Da der kubische Spline in der Praxis vor allem in Bezug auf den Umgang mit stark lückenhaf-ten Jahren leichter zu handhaben ist, kaum Unterschiede bezüglich des Ergebnisses zwischen beiden Verfahren bestehen und keine Notwendigkeit vorhanden ist, die die Verwendung von Sinusschwingungen impliziert, wird im Folgenden nur noch der Spline verwendet.

Für die Enttrendung mithilfe des Splines wird nun noch getestet, wie sich verschiedene An-zahlen von Stützstellen auswirken. In Abbildung 5.5 werden die Verläufe dargestellt. Es sind zwei Regime erkennbar. Einerseits ähneln sich die Ergebnisse mit 6-, 8- und 10-Stützstellen (minimale Periodendauern: 104, 81 und 66 Tage) und andererseits die mit 15-, 20-, und 25-Stützstellen (minimale Periodendauern: 46, 35 und 28 Tage). Insgesamt ist ein relativ ähnlicher übergeordneter Verlauf erkennbar. Die Entscheidung für die weitere Bearbeitung fiel auf den 6-Stützstellen-Spline, da dieser Spline alle Wellen größer 100 Tagen approximiert und sicher keine Anteile der laufenden planetaren Wellen aus den Daten entfernt.

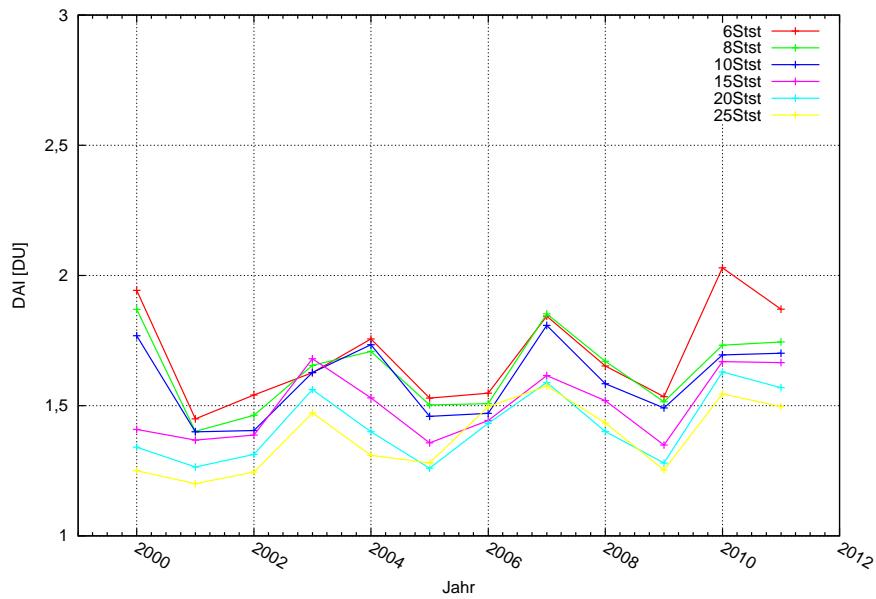


Abbildung 5.5: Analoge Darstellung zu Abb. 5.3 allerdings basierend auf alleiniger Verwendung einer splinebasierten Enttrendung und verschiedener Stützstellen.

Nach der Anpassung des kubischen Splines mit 6 Stützstellen, wurden die Differenzen zwischen diesem und dem DAI berechnet. Anschließend wurden die aufsummierten Absolutwerte durch die Anzahl an vorhandenen Datenpunkten geteilt. Die Ergebnisse dieses Verfahrens werden mit „DAI*“ bezeichnet und als Maß für den laufenden Anteil der planetaren Wellen verwendet. Für die enttrendeten Daten mithilfe der HA wurden die gleichen Rechenschritte vollzogen (siehe Abb. 5.3).

Abbildung 5.6 zeigt die Zeitreihe des DAI*. Der DAI* stellt den Mittelwert der absoluten Abweichungen zwischen DAI und Enttrendung dar. Dementsprechend geben die Fehlerbalken den mittleren Fehler des Mittelwertes an und sind somit rein statistischer Natur.

Gut erkennbar ist eine etwa zwei- bis vierjährige Oszillation. Die Amplitude dieser Oszillation variiert im Laufe der 33 Jahre. In der ersten Hälfte dominiert die zweijährige Schwingung, in der zweiten Hälfte die vierjährige. Die Amplitude ist Mitte der 1980er Jahre minimal, während sie etwa ab dem Jahr 2000 zunimmt.

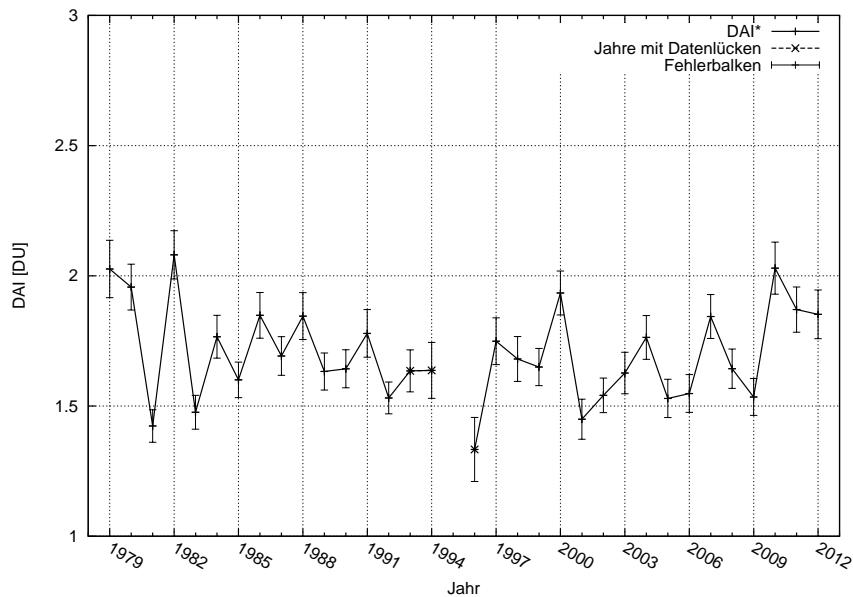


Abbildung 5.6: Die DAI*-Zeitreihe des kubischen Splines mit Fehlerbalken. (Jahre mit vollständigen Daten (+), Jahre mit Datenlücken (×))

5.2 Vergleich laufender planetarer Wellen in der Stratosphäre und der Mesopause

Wie bereits erwähnt, können planetare Wellen nicht nur in der Stratosphäre beobachtet werden, sondern mittels Temperaturdaten auch in der Mesopause. Diese werden mithilfe von GRIPS-Instrumenten erfasst. In Höppner und Bittner (2007) sind zwei Varianten publiziert, um die Aktivität laufender planetarer Wellen in diesen Daten zu erfassen. Während eine Methode auf der Analyse der Standardabweichung der enttrendeten Nachtmittelwerte beruht (im Folgenden mit mesosphärischer DAI 1 bezeichnet), wird bei der zweiten Methode eine Spektralanalyse (Waveletanalyse) auf die enttrendeten Nachtmittelwerte angewandt und die Ergebnisse geeignet zusammengefasst (im Folgenden als mesosphärischer DAI 2 bezeichnet). Die Ergebnisse aus Höppner und Bittner (2007) wurden aktualisiert und zur Verfügung gestellt. (Wachter, P.; persönliche Kommunikation). Sie sind in Abbildung 5.7 dargestellt.

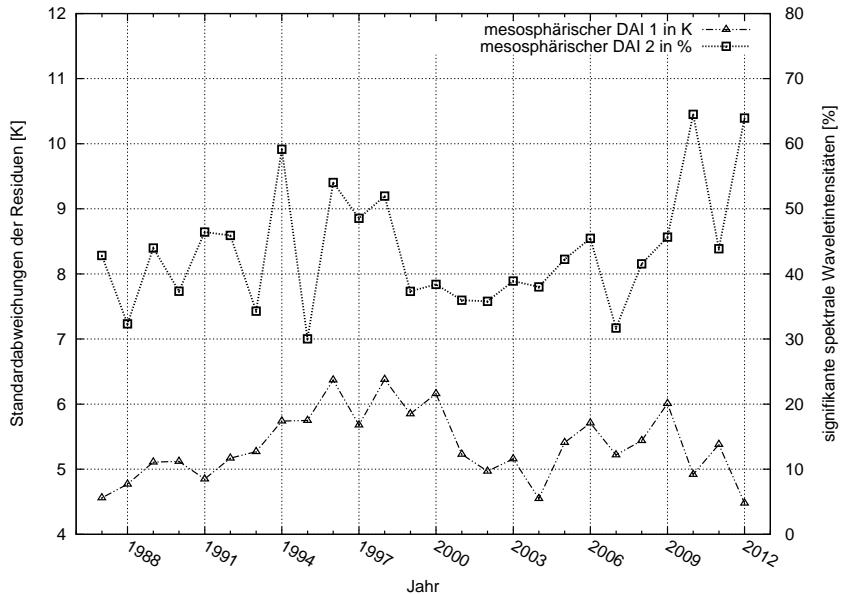


Abbildung 5.7: Die Zeitreihe des mesosphärischen DAI 1 (\triangle) & DAI 2 (\square).

Nun werden die verschiedenen Maße für die Aktivität laufender planetarer Wellen in unterschiedlichen Höhenbereichen verglichen (Abb. 5.8 und 5.9).

In Abbildung 5.8 ist in den Jahren vor der Datenlücke eine Antikorrelation erkennbar, während zwei Jahre nach der Datenlücke für kurze Zeit eine Korrelation festgestellt werden kann. Ab 2003 sind die Daten wieder antikorreliert.

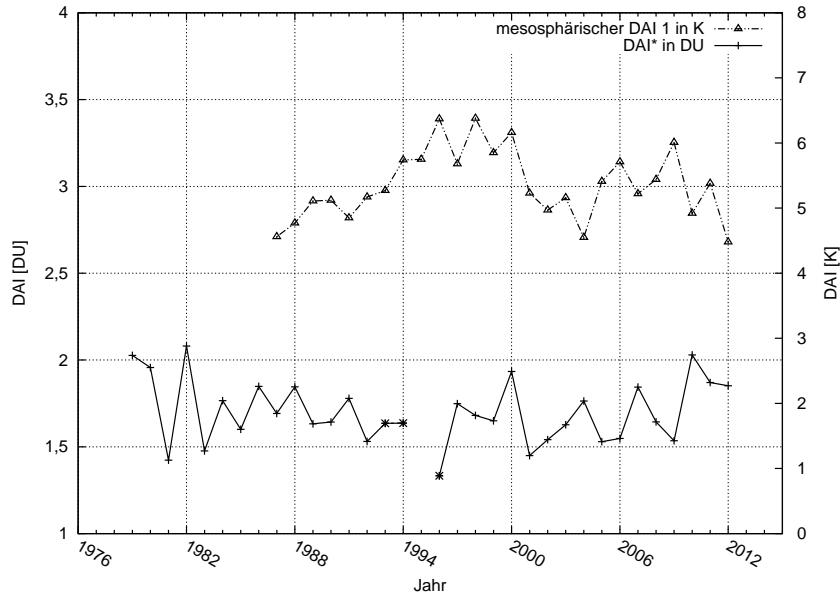


Abbildung 5.8: Vergleich des DAI* (+) mit dem mesosphärischen DAI 1 (\triangle).

Bei Abbildung 5.9 ist ein stetiger Wechsel von Antikorrelation und Korrelation auszumachen. Die einzelnen Phasen dauern minimal zwei Jahre bis maximal sechs Jahre an. Der Bereich der Datenlücke wird bei dieser Betrachtung außer Acht gelassen.

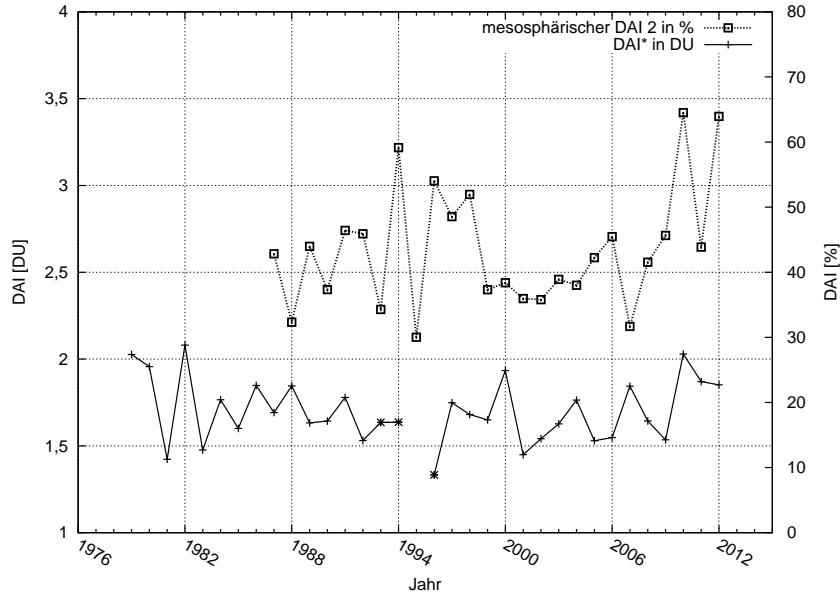


Abbildung 5.9: Vergleich des DAI* (+) mit dem mesosphärischen DAI 2 (□).

Da durch die Arbeit von Höppner und Bittner (2007) die Kenntnis vorliegt, dass die Phänomene in der Stratosphäre einen zeitlichen Versatz zur Mesopause haben, wurden die Korrelationskoeffizienten (nur von Jahren deren Daten vollständig sind) der Zeitreihen mit einem Versatz der Stratosphäre von + drei bis – drei Jahren berechnet. In Abbildung 5.10 sind die Korrelationskoeffizienten des Vergleichs zwischen dem DAI* und dem mesosphärischen DAI 1 dargestellt. Hier liegt der höchste Wert bei einem Versatz von minus drei Jahren und zeigt eine Antikorrelation von $\sim 20\%$ auf. Die höchste Korrelation beim Vergleich DAI* zu mesosphärischen DAI 2 tritt bei einem Versatz von minus zwei Jahren auf ($\sim 45\%$). Es liegt überwiegend Korrelation vor (siehe Abb. 5.11). Die zugehörigen Vergleiche sind in Abbildung 5.12 und 5.13 zu sehen. Die restlichen Darstellungen der Vergleiche mit Versatz sind im Anhang unter A5 und A6 zu finden.

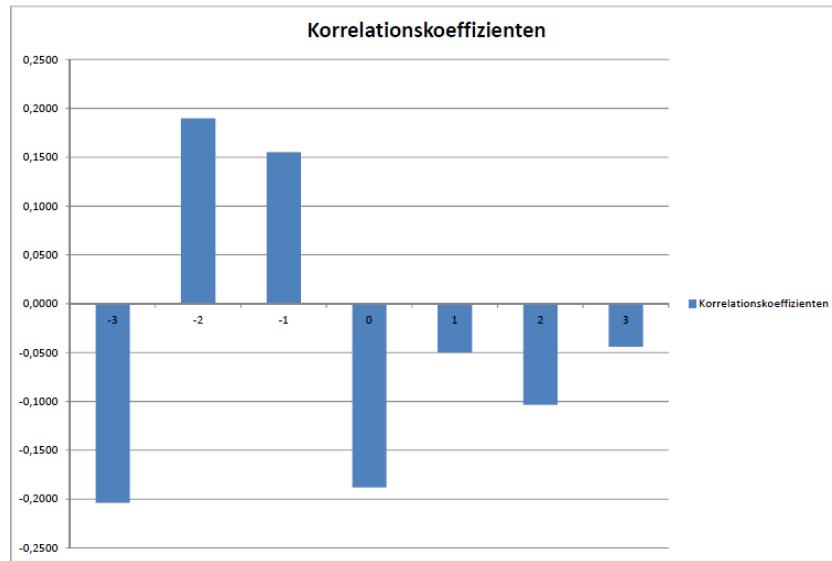


Abbildung 5.10: Korrelationskoeffizienten des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1.

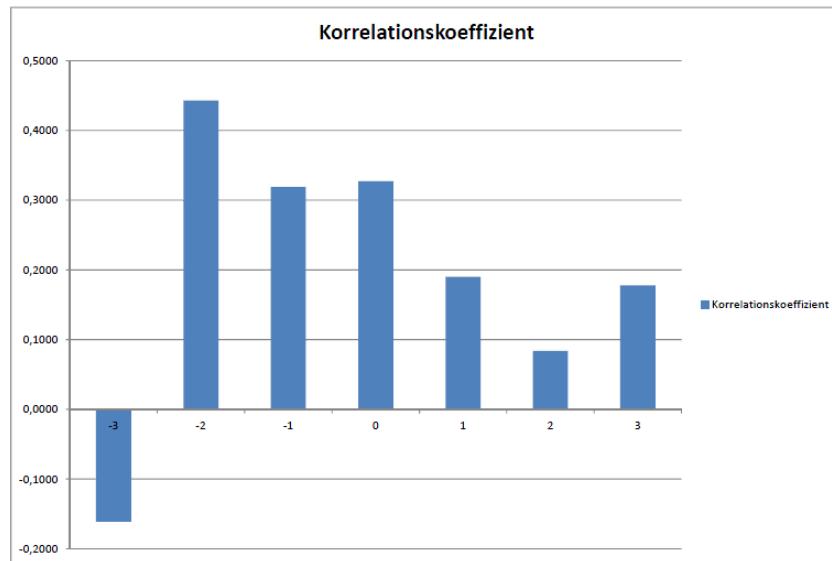


Abbildung 5.11: Korrelationskoeffizienten des DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2.

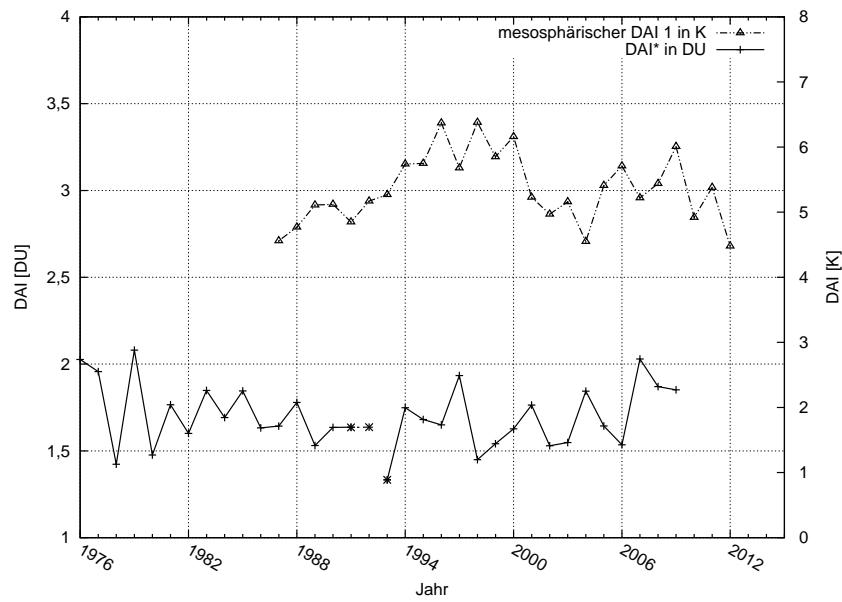


Abbildung 5.12: Vergleich des um drei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1.

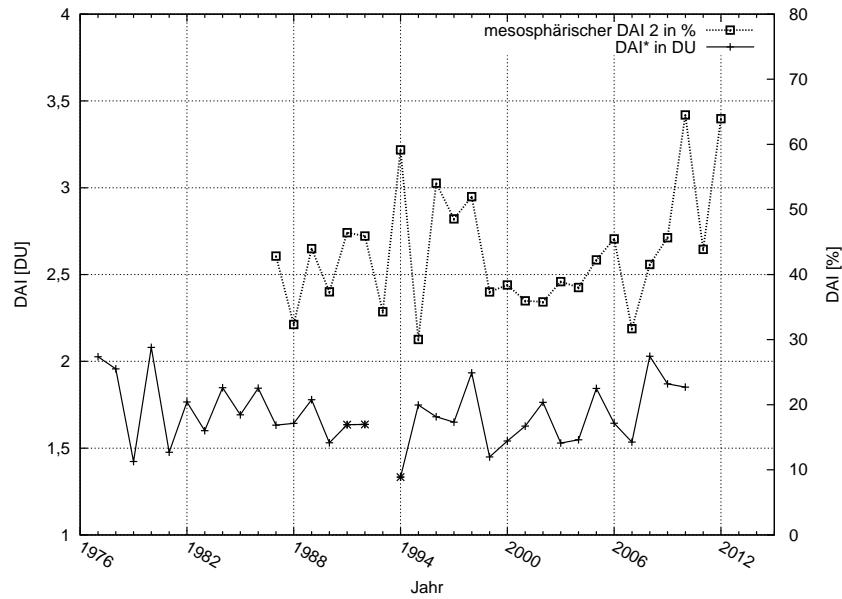


Abbildung 5.13: Vergleich des um zwei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2.

Der Korrelationskoeffizient ist damit in keinem der Fälle sehr ausgeprägt. Aufgrund der ähnlichen Analysemethode wäre prinzipiell ein stärkerer Zusammenhang zwischen DAI* und mesosphärischen DAI 1 als zwischen DAI* und mesosphärischen DAI 2 zu erwarten. Dies ist im Rahmen der zwei- bis vierjährigen Schwingung auch zu sehen. Abbildung 5.12 weist hier meist antikorreliertes Verhalten auf, bei Abbildung 5.13 ist dies - auch aufgrund der kürzeren vergleichbaren Datenreihe - schlechter erkennbar. Ähnlich verhält es sich bei Abbildung 5.8 und 5.9. Jedoch wird der übergeordnete Verlauf des mesosphärischen DAI 1 und DAI 2 im stratosphärischen DAI kaum wiedergegeben. Während die kurzperiodische Schwingung in Höppner und Bittner (2007) der QBO zugeordnet wird, lässt sich die längerperiodische Variation auf die solare Aktivität zurückführen. Dies bedeutet für die vorliegenden Ergebnisse, dass es zwar Hinweise auf den Einfluss der QBO auf laufende stratosphärische planetare Wellen gibt, dies jedoch in dieser Form nicht für solare Signale gilt. Im Allgemeinen ist das Auftreten der QBO-Signale in der Stratosphäre und der Mesopause entgegengesetzt (siehe Abb. 5.8 und 5.12).

5.3 Vergleich laufender planetarer Wellen in 30, 50, 70 und 90 km Höhe mit der Stratosphäre und der Mesopause

Im Folgenden wird die Berechnung des DAI* abschließend auf SABER-Temperaturdaten verschiedener Höhen angewandt (Gitterung: 5° Breite und 1,25° Länge). Abbildung 5.14 zeigt die Ergebnisse. Aus Ihnen wird deutlich, dass die Aktivität der planetaren Wellen in größeren Höhen stärker als in geringeren Höhen ist.

Auch hier ist in allen Fällen eine zwei- bis dreijährige Schwingung erkennbar, wobei diese zum Ende der Zeitreihe abschwächt. Ein QBO-Einfluss kann also auch hier vermutet werden.

Die Gegenüberstellung aller DAI*-Werte (siehe Abb. 5.15 und 5.16) sowie den mesosphärischen DAI-Werten weist auf deutlich geringere Variabilität in den SABER-Messungen hin. Untersuchungen hierzu liegen außerhalb des Fokus dieser Arbeit.

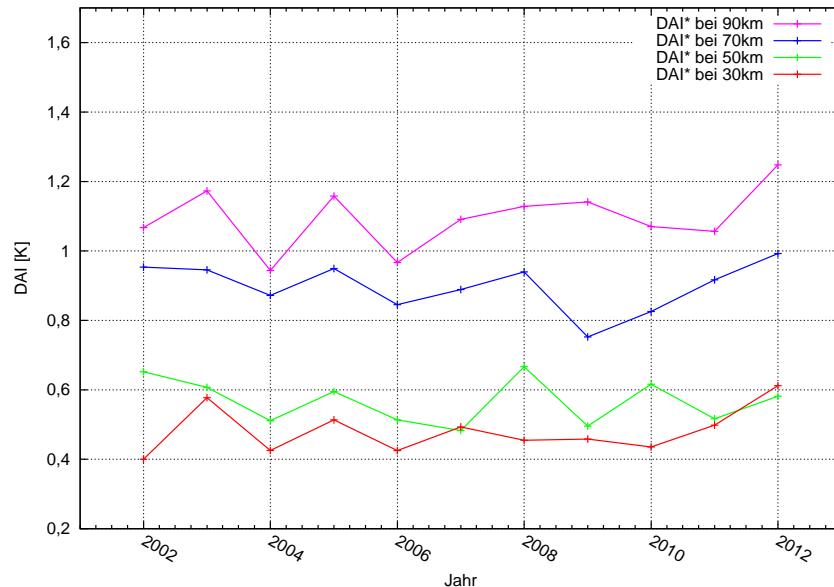


Abbildung 5.14: Zeitreihe der SABER-Daten für die einzelnen Höhen. (DAI* in Kelvin)

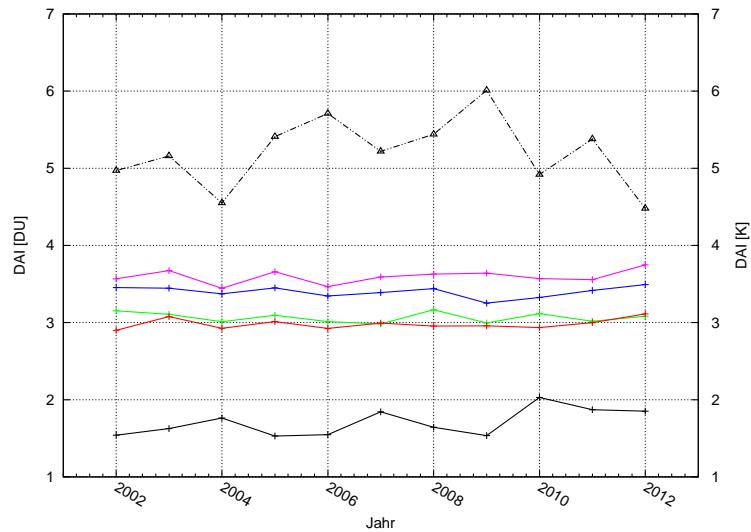


Abbildung 5.15: Vergleich der SABER-Daten mit dem DAI* der Ozondaten und dem mesosphärischen DAI 1. (gestrichelte schwarze Kurve: mesosphärischer DAI 1 in K; pinke Kurve: DAI* bei 90km in K (+2,5 K); blaue Kurve: DAI* bei 70km in K (+2,5 K); grüne Kurve: DAI* bei 50km in K (+2,5 K); rote Kurve: DAI* bei 30km in K (+2,5 K); schwarze Kurve: DAI* in DU)

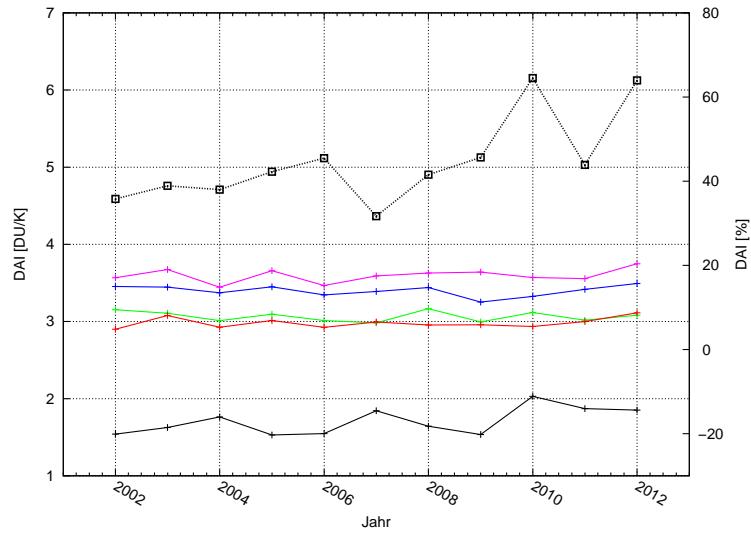


Abbildung 5.16: Vergleich der SABER-Daten mit dem DAI* der Ozondaten und dem mesosphärischen DAI 2. (gepunktete schwarze Kurve: mesosphärischer DAI 2 in K; pinke Kurve: DAI* bei 90km in K (+2,5 K); blaue Kurve: DAI* bei 70km in K (+2,5 K); grüne Kurve: DAI* bei 50km in K (+2,5 K); rote Kurve: DAI* bei 30km in K (+2,5 K); schwarze Kurve: DAI* in DU)

6 Zusammenfassung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit wurden Messdaten aus verschiedenen Höhenbereichen untersucht, um die Aktivität laufender planetarer Wellen in der Atmosphäre zu untersuchen.

Zunächst musste der quasistationäre Anteil aus dem DAI, welcher ein Maß für die Aktivität planetarer Wellen in der Stratosphäre ist, extrahiert werden. Dafür wurde mithilfe des kubischen Splines eine Enttrendung des DAI pro Jahr vorgenommen. Anschließend wurde die absolute Differenz zwischen DAI und Enttrendung aufsummiert und durch die Anzahl an vorhandenen Datenpunkten geteilt. Daraus wurde ein Jahreswert gebildet, welcher für die TOMS/OMI/GOME-2-Daten in einer Zeitreihe von 33 Jahren mit vier Jahren Datenlücken dargestellt wird (siehe Abb. 6.1). Ebenso wurden diese Berechnungsschritte für die SABER-Daten in 30, 50, 70 und 90 km Höhe durchgeführt (siehe Abb. 6.2). Diese Daten werden seit 2002 erhoben und somit sind Daten für einen Zeitraum von 10 Jahren vorhanden.

Die Ergebnisse wurden untereinander sowie mit der (bereitgestellten) Aktivität planetarer Wellen in der Mesopause (siehe Abb. 6.3) verglichen.

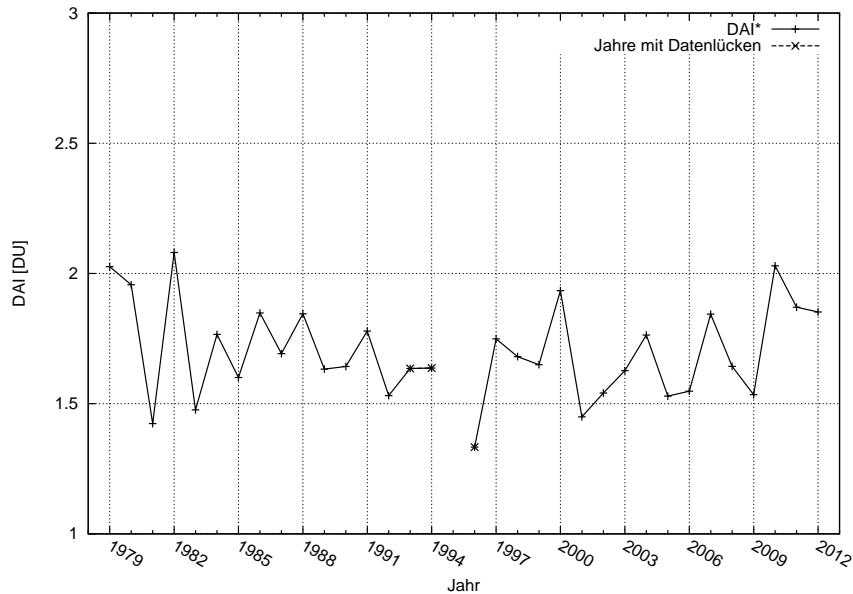


Abbildung 6.1: Die DAI*-Zeitreihe des kubischen Splines.

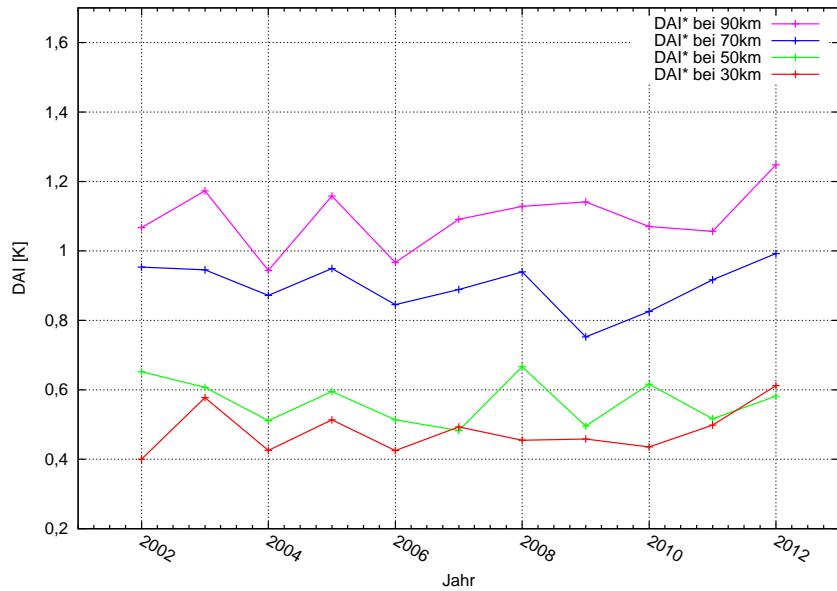


Abbildung 6.2: Zeitreihe der SABER-Daten für die einzelnen Höhen. (DAI* in Kelvin)

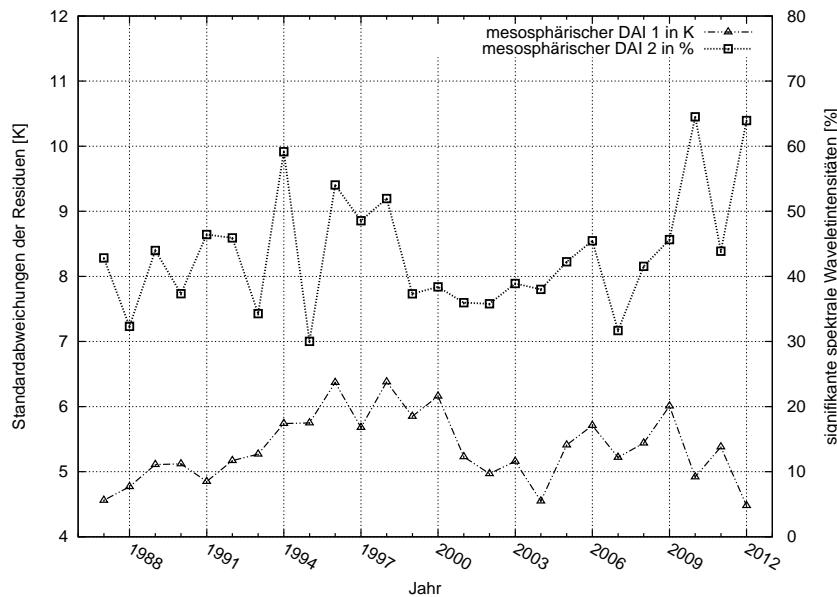


Abbildung 6.3: Die Zeitreihe des mesosphärischen DAI 1 (Δ) & DAI 2 (\square).

Alle Zeitreihen sind durch eine zwei- bis vierjährige Oszillation gekennzeichnet, die wahrscheinlich der QBO zugeordnet werden kann. Diese Oszillationen sind vor allem in den mehr als zehnjährigen Datenreihen (TOMS/OMI/GOME-2 und GRIPS) zum Teil unterschiedlich stark ausgeprägt.

Die differierende Aktivität wurde, was die Mesopausendaten betrifft, in Höppner und Bittner (2007) der variablen solaren Aktivität zugeschrieben. Ein Zusammenhang zwischen den solaren Zyklen und der Aktivität planetarer Wellen in der Stratosphäre ist - auch aufgrund einer Datenlücke - nicht unmittelbar zu erkennen. Die den beiden Zeitreihen überlagerte zwei- bis vierjährige Schwingung zeigt jedoch in der Stratosphäre und Mesopause meist eine Antikorrelation.

Die Untersuchung der Ursache dieser Antikorrelation, z.B. aufgrund der Ausbreitungsgeschwindigkeit der QBO, sowie die vertiefende Analyse der stratosphärischen Zeitreihe bezüglich eines solaren Einflusses ist Gegenstand weiterer Forschungsarbeiten.

Danksagung

Ich möchte mich bei allen ganz herzlich bedanken, die zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt besonders:

- *Dr. Sabine Wüst* und *Ricarda Kramer* für die ausgezeichnete Betreuung, Unterstützung und Förderung während der gesamten Zeit.
- *Paul Wachter* und *Christina Piecha* für die Hilfe bei Fragen jeglicher Art.

Zudem möchte ich der gesamten Abteilung DFD-ATM für die freundliche Aufnahme im Team danken.

Ebenso möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freunden bedanken, ganz besonders bei Esther Oßwald und Manuela Gegenfurtner. Sie sind mir immer mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Anhang

A1

Tabelle_1 Datenlücken der Ozonsensoren

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
1979			1979		
42	19790103	2		19790817	1
	19790108	1		19790916	1
	19790116	1		19791006	1
	19790120	1		19791211	1
	19790122	1		19791222	1
	19790209	1	1980		
	19790213	1	4	19800320	1
	19790221	1		19800524	1
	19790305	1		19800919	1
	19790309	1		19800929	1
	19790317	1	1981		
	19790321	1	1	19811207	1
	19790329	1	1982		
	19790414	1	1	19820314	1
	19790422	1	1984		
	19790426	1	1	19840723	1
	19790504	2	1985		
	19790508	1	1	19850616	1
	19790512	1	1986		
	19790520	1	2	19860402	1
	19790526	1		19860420	1
	19790528	1	1989		
	19790601	1	1	19890305	1
	19790605	1	1991		
	19790609	1	1	19910428	1
	19790613	7	1993		
	19790621	1	76	19930602	2
	19790623	1		19930606	40
	19790804	1		19930926	34

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
1994			2005		
143	19940110	34	22	20050120	2
	19940426	35		20050221	2
	19940706	2		20050325	2
	19940811	34		20050426	2
	19941031	1		20050528	2
	19941111	1		20050629	2
	19941125	36		20050731	2
1996				20050901	2
206	19960101	205		20051003	2
	19961128	1		20051104	2
1997				20051206	2
13	19970407	1	2006		
	19971116	4	21	20060107	2
	19971205	8		20060208	2
1998				20060228	3
22	19980513	1		20060616	2
	19981117	2		20060718	2
	19981213	19		20060819	2
1999				20060920	2
4	19990101	2		20061022	2
	19991117	2		20061123	2
2001				20061225	2
1	20011118	1	2007		
2002			23	20070126	2
11	20020803	10		20070227	2
	20021119	1		20070331	2
2003				20070502	2
15	20030115	1		20070603	2
	20030516	8		20070705	2
	20031128	6		20070806	2
2004				20070907	2
9	20041125	5		20071009	2
	20041209	2		20071110	2
	20041230	2		20071212	2
				20071219	1

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
2008			2010		
28	20080113	2		20100702	1
	20080214	2		20100731	1
	20080229	1		20100829	1
	20080317	2		20100927	4
	20080418	2		20101005	1
	20080520	2		20101025	1
	20080621	2		20101103	1
	20080723	2		20101120	2
	20080824	2		20101123	1
	20080925	5		20101205	3
	20081027	2		20101209	1
	20081128	2		20101214	1
	20081230	2		20101222	1
2009			2011		
22	20090131	2	24	20110104	5
	20090304	2		20110120	1
	20090405	2		20110211	2
	20090507	2		20110214	1
	20090608	2		20110218	1
	20090710	2		20110319	1
	20090811	2		20110417	1
	20090912	2		20110516	1
	20091014	2		20110614	1
	20091115	2		20110713	1
	20091217	2		20110811	1
2010				20110909	1
37	20100101	5		20110928	1
	20100108	1		20111008	1
	20100204	3		20111023	3
	20100212	4		20111106	1
	20100219	1		20111205	1
	20100308	1			
	20100406	1			
	20100505	1			
	20100603	1			

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe		
2012		
59	20120101	3
	20120201	1
	20120228	2
	20120330	1
	20120409	1
	20120428	1
	20120527	1
	20120625	1
	20120724	1
	20120728	1
	20120807	1
	20120814	9
	20120920	1
	20121019	1
	20121117	1
	20121128	33

A2

Tabelle_2.1 Datenlücken des SABER-Instrumentes in einer Höhe von 30 km

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
2002			2007		
35	20020101	24	2	20070717	1
	20020302	1		20070726	1
	20020329	1			
	20020511	3	2008		
	20020720	3	12	20080109	9
	20020924	1		20080524	1
	20021203	1		20081025	2
	20021211	1	2009		
2003			9	20090614	6
10	20030128	2		20091015	1
	20030402	6		20091202	2
	20030718	1	2010		
	20031118	1	3	20100214	1
2004				20100511	1
8	20040110	1		20101126	1
	20040318	1	2011		
	20040917	5	1	20111124	1
	20041001	1	2012		
2005			2	20120321	1
7	20050217	1		20121226	1
	20050320	1			
	20050327	4			
	20051116	1			
2006					
6	20060217	1			
	20060817	1			
	20060920	1			
	20061206	3			

Tabelle_2.2 Datenlücken des SABER-Instrumentes in einer Höhe von 50 km

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
2002			2007		
34	20020101	24	2	20070717	1
	20020302	1		20070726	1
	20020329	1			
	20020511	3	2008		
	20020720	3	12	20080108	10
	20020924	1		20080524	1
	20021203	1		20081025	1
2003			2009		
10	20030128	2	9	20090614	6
	20030402	6		20091015	1
	20030718	1		20091202	2
	20031118	1	2010		
2004			3	20100214	1
8	20040110	1		20100511	1
	20040318	1		20101126	1
	20040917	5	2011		
	20041001	1	1	20111124	1
2005			2012		
6	20050217	1	2	20120321	1
	20050327	4		20121226	1
	20051116	1			
2006					
6	20060217	1			
	20060817	1			
	20060920	1			
	20061206	3			

Tabelle_2.3 Datenlücken des SABER-Instrumentes in einer Höhe von 70 km

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
2002			2007		
35	20020101	24	2	20070717	1
	20020302	1		20070726	1
	20020329	1			
	20020511	3	2008		
	20020720	3	12	20080109	9
	20020924	1		20080524	1
	20021203	1		20081025	2
	20021211	1	2009		
2003			9	20090614	6
10	20030128	2		20091015	1
	20030402	6		20091202	2
	20030718	1	2010		
	20031118	1	3	20100214	1
2004				20100511	1
8	20040110	1		20101126	1
	20040318	1	2011		
	20040917	5	1	20111124	1
	20041001	1	2012		
2005			2	20120321	1
7	20050217	1		20121226	1
	20050320	1			
	20050327	4			
	20051116	1			
2006					
6	20060217	1			
	20060817	1			
	20060920	1			
	20061206	3			

Tabelle_2.4 Datenlücken des SABER-Instrumentes in einer Höhe von 90 km

Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke	Jahr	Beginn der Datenlücke	Größe der Datenlücke
Summe			Summe		
2002			2007		
36	20020101	24	3	20070303	1
	20020301	2		20070717	1
	20020329	1		20070726	1
	20020511	3	2008		
	20020720	3	12	20080108	10
	20020924	1		20080524	1
	20021203	1		20081025	1
	20021211	1	2009		
2003			9	20090614	6
10	20030128	2		20091015	1
	20030402	6		20091202	2
	20030718	1	2010		
	20031118	1	3	20100214	1
2004				20100511	1
8	20040110	1		20101126	1
	20040318	1	2011		
	20040917	5	1	20111124	1
	20041001	1	2012		
2005			2	20120321	1
7	20050217	1		20121226	1
	20050320	1			
	20050327	4			
	20051116	1			
2006					
6	20060217	1			
	20060817	1			
	20060920	1			
	20061206	3			

A3

Tabelle_3 Ausreißer in den SABER-Daten

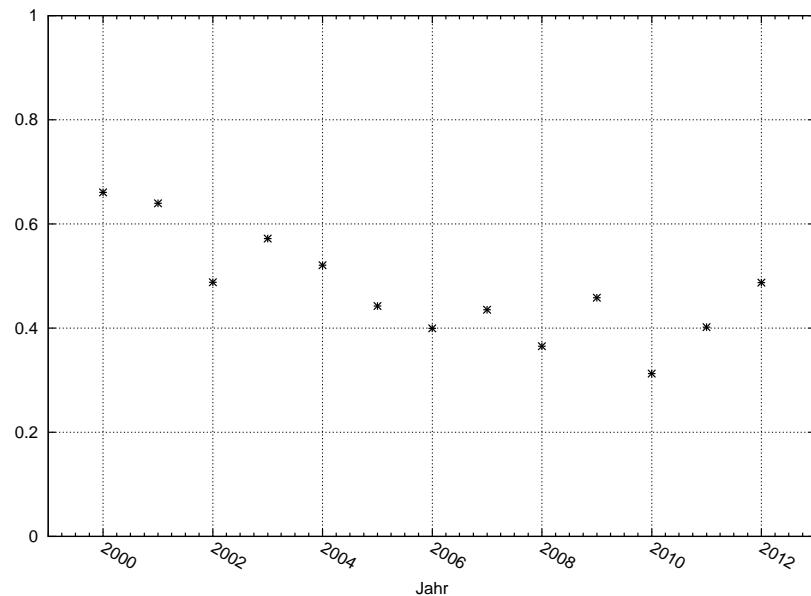
Jahr	Höhe	Datum	Wert	Datum	Wert	Datum	Wert	Datum	Wert
2002	30km	20020329	> 1000	20021203	87	20021211	31		
	50km	20020329	154	20021203	141				
	70km	20020329	370	20021203	198	20021211	23		
	90km	20020329	585	20021203	529	20021211	48	20020301	12
2005	30km	20050320	13	20050327	69	20050328	89	20050330	9
	50km			20050327	126	20050328	155		
	70km	20050320	14	20050327	112	20050328	168	20050330	21
	90km	20050320	50	20050327	400	20050328	313		
2007	30km			20070726	126				
	50km			20070726	152				
	70km			20070726	281				
	90km	20070303	18	20070726	818				
2008	30km			20081026	11				
	50km	20080108	18	20081026	31				
	70km			20081026	33				
	90km								
2010	30km	20101126	610						
	50km	20101126	420						
	70km	20101126	661						
	90km	20101126	> 1000						
2011	30km	20111124	144						
	50km	20111124	663						
	70km	20111124	> 1000						
	90km	20111124	916						
2012	30km	20120321	286	20121226	346				
	50km	20120321	347	20121226	387				
	70km			20121226	529				
	90km	20120321	> 1000	20121226	> 1000				

Wenn Wert den kleinsten direkt benachbarten Wert um mehr als 25 Kelvin überschreitet.

Wenn Wert den kleinsten direkt benachbarten Wert um weniger als 25 Kelvin aber mehr als 45 % überschreitet.

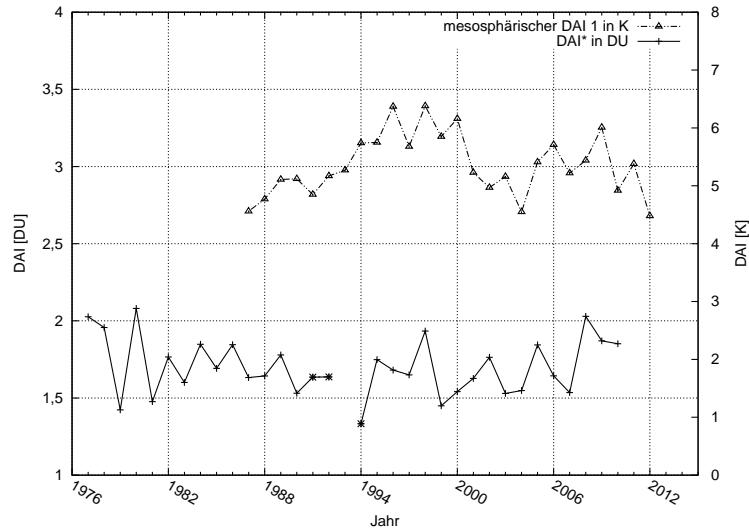
A4

Grafik_1 Güte der Anpassung der harmonischen Analyse

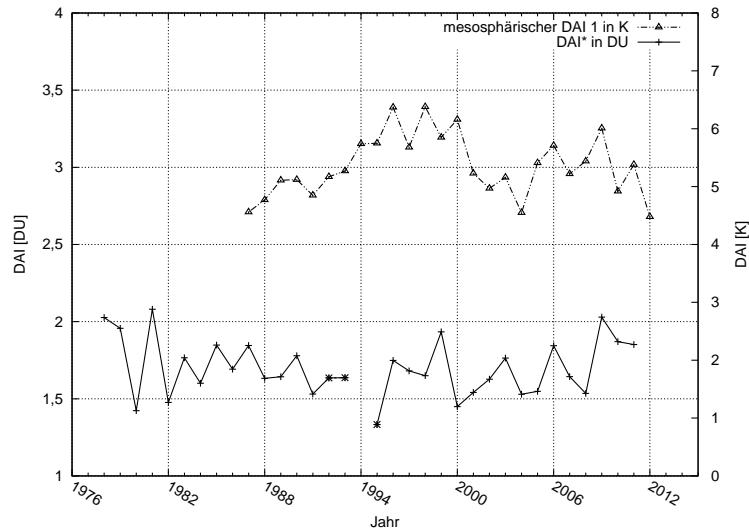


A5

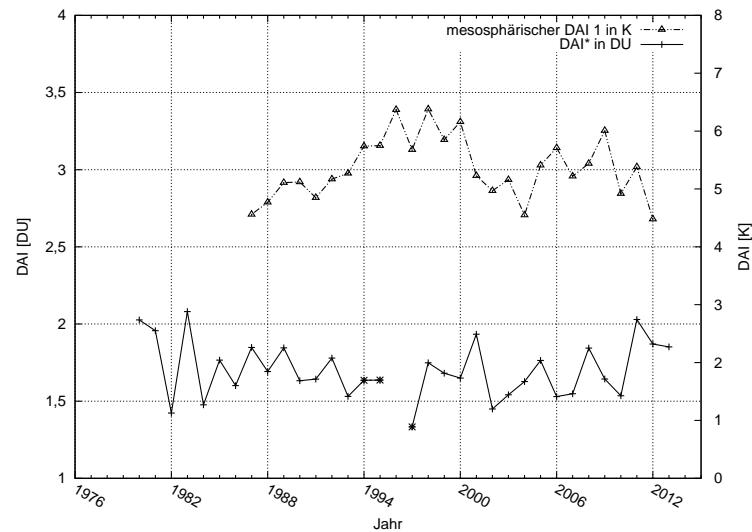
Grafik_2.1 Vergleich des um zwei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1



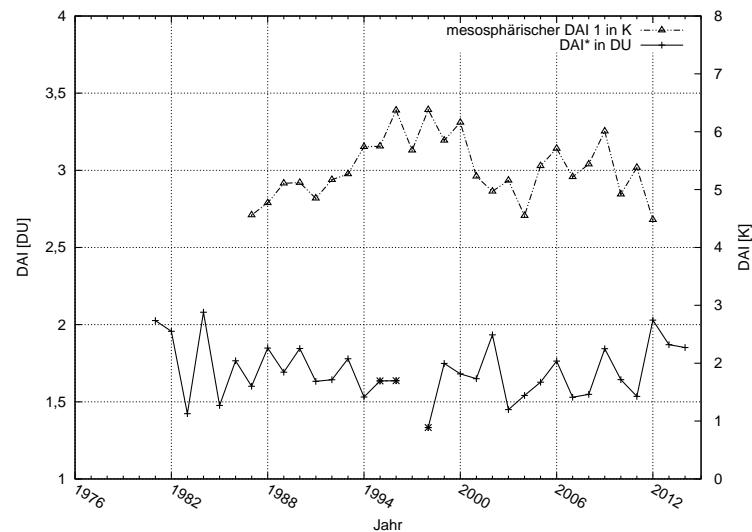
Grafik_2.2 Vergleich des um ein Jahr nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1



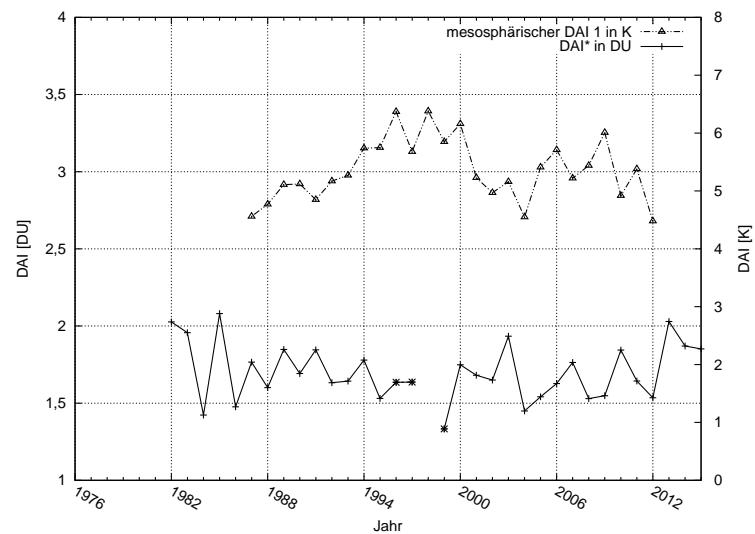
Grafik_2.3 Vergleich des um ein Jahr nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1



Grafik_2.4 Vergleich des um zwei Jahre nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1

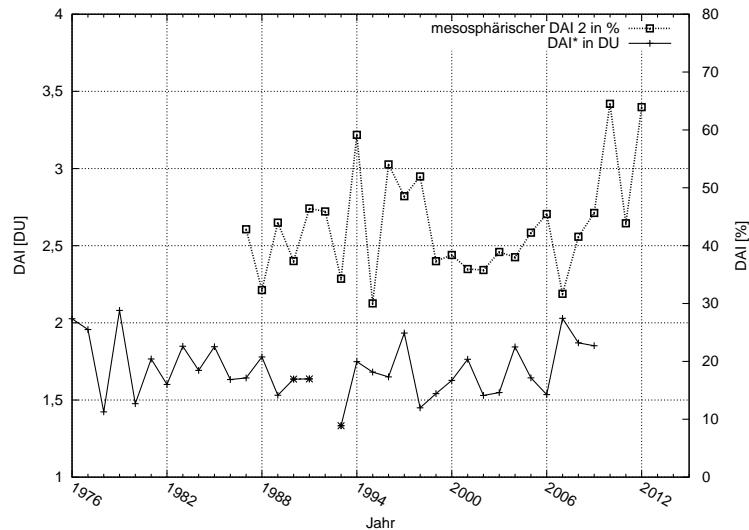


Grafik_2.5 Vergleich des um drei Jahre nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 1

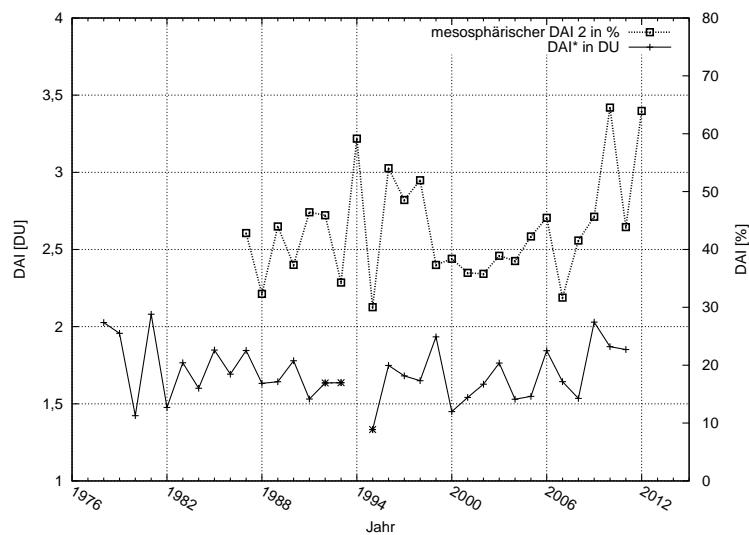


A6

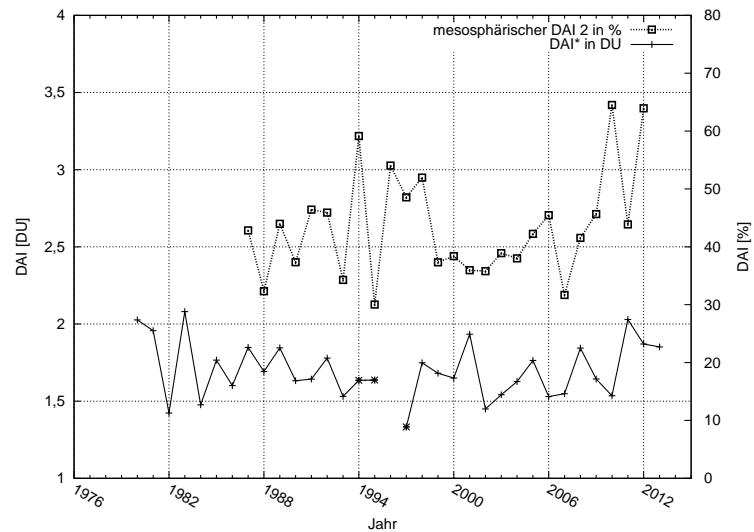
Grafik_3.1 Vergleich des um drei Jahre nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2



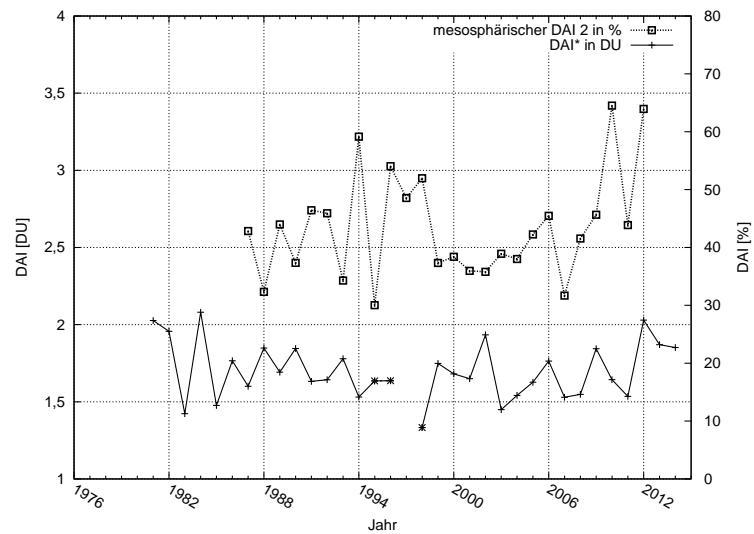
Grafik_3.2 Vergleich des um ein Jahr nach hinten verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2



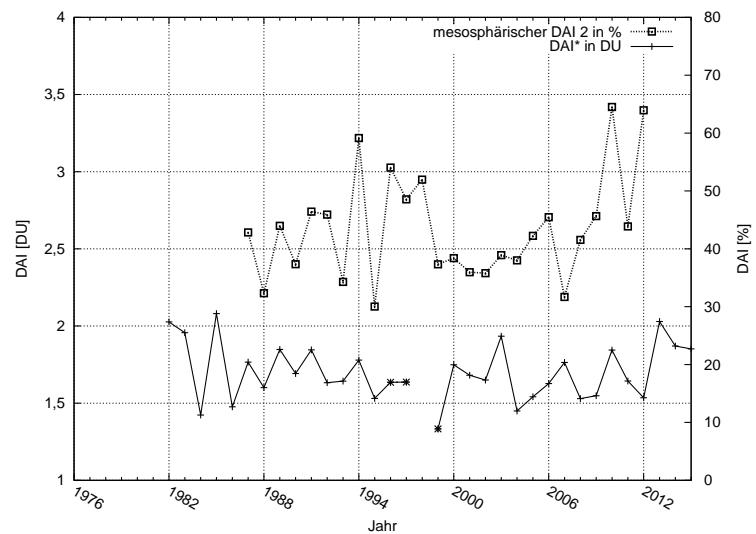
Grafik_3.3 Vergleich des um ein Jahr nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2



Grafik_3.4 Vergleich des um zwei Jahre nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2



Grafik_3.5 Vergleich des um drei Jahre nach vorne verschobenen DAI* mit dem mesosphärischen DAI 2



Literatur

- Andrews, D. G., 2010. An Introduction to Atmospheric Physics. Cambridge University Press.
- Aura, (26.02.2013). Aura Satellit-Information.
URL <http://aura.gsfc.nasa.gov/spacecraft/index.html>; <http://aura.gsfc.nasa.gov/instruments/omi.html>
- Bittner, M., 1993. Langperiodische Temperaturosillationen in der unteren und mittleren Atmosphäre (0-100km) während der DYANA-Kampagne. Dissertation - Bergische Universität/Gesamthochschule Wuppertal.
- Bittner, M., 2002. Ozon in der Stratosphäre - ein Überblick. Technischer Bericht, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR-DFD), Oberpfaffenhofen.
- Bittner, M., Dech, S. W., 1997. GOME: Globale Satellitenmessungen des Gesamtozons ermöglichen Verfolgung der dynamischen Aktivität der mittleren Atmosphäre. In: Ozonbulletin des Deutschen Wetterdienstes. Ausgabe Nr. 42.
- Blome, H., Duerbeck, H., Feitzinger, J., Hoell, J., Priester, W., Scheffler, H., Speer, F., 2002. Sterne und Weltraum. Walter de Gruyter Verlag - Berlin, New York.
- Demtröder, W., 2005. Kern-, Teilchen- und Astrophysik. (Experimentalphysik 4). Springer-Verlag - Berlin, Heidelberg, New York.
- Earth-Probe, (26.02.2013). Earth-Probe Satellit-Information.
URL <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1996-037A>; <http://science.nasa.gov/missions/adeos/>
- Engelhardt, T., 1990. Planeten, Monde und Kometen. Wissenschaftliche Buchgesellschaft - Darmstadt.
- Erbertseder, T., Eyring, V., Bittner, M., Dameris, M., Grewe, V., 2006. Hemispheric ozone variability indices derived from satellite observations and comparison to a coupled chemistry-climate model. In: Atmospheric Chemistry and Physics. Ausgabe Nr. 6, S. 5101-5120.
- ESA/EUMETSAT-GOME-2, (26.02.2013). GOME-2 Instrument-Information.
URL <http://wdc.dlr.de/sensors/gome2/>; http://www.eumetsat.int/home/main/satellites/metop/instruments/sp_2010053161447506
- Fernerkundung, (28.04.2013). Informationen zur Fernerkundung.
URL <http://www.geomanie.de/fileadmin/content/downloads/referate/Fernerkundung.pdf>

- Freund, R. W., Hoppe, R. H. W., 1990. Stoer/Bulirsch: Numerische Mathematik 1. Springer-Verlag - Berlin, Heidelberg, New York, 10. Auflage.
- FU-Berlin, (26.02.2013). QBO 1953-2012.
URL http://www.geo.fu-berlin.de/met/ag/strat/produkte/qbo/qbo_wind_pdf.pdf
- Historie, (28.04.2013). Geschichte der Fernerkundung.
URL http://www.planet-wissen.de/natur_technik/naturschutz/globaler_wandel/die_geschichte_der_fernerkundung.jsp
- Höppner, K., 2009. Beobachtung des Hydroxyl (OH*) - Airglow: Untersuchung von Klimasignalen und atmosphärischen Wellen. Dissertation - Julius-Maximilians-Universität Würzburg.
- Höppner, K., Bittner, M., 2007. Evidence for solar signals in the mesopause temperature variability? In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Ausgabe Nr. 69, S. 431-448 (doi:10.1016/j.jastp.2006.10.007.).
- Knabner, P., 1998. Skript zur Vorlesung "Nummerische Mathematik I", WS 1998/99, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.
- Labitzke, K. G., 1999. Die Stratosphäre: Phänomene, Geschichte, Relevanz. Springer Verlag - Berlin, Heidelberg, New York.
- Lange, G., 1982. Messung der Infrarotemission von OH* und O2 in der Mesosphäre. Dissertation - Universität Wuppertal.
- Latif, M., 2009. Klimawandel und Klimadynamik. Verlag Eugen Ulmer - Stuttgart.
- Liljequist, G. H., Cehak, K., 1984. Allgemeine Meteorologie. Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH - Braunschweig, 3. Auflage.
- Meinel, A. B., 1950. OH emission bands in the spectrum of the night sky. Part II. In: The Astrophysical Journal. Ausgabe 112, S. 120-130.
- Meteor-3, (26.02.2013). Meteor-3 Satellit-Information.
URL <http://www.astronautix.com/craft/meteor3.htm>
- MetOp-A, (26.02.2013). MetOp-A Satellit-Information.
URL http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabcid-5519/9216_read-17725/
- Moussas, X., Polygniannakis, J. M., Preka-Papadema, P., Exarhos, G., 2005. Solar cycles: A tutorial. In: Advances in Space Research. Ausgabe Nr. 35, S. 725-738.

NASA-MSFC, (26.02.2013). The solar Dynamo.

URL <http://solarscience.msfc.nasa.gov/dynamo.shtml>

NASA-OMI(a), (26.02.2013). OMI Instrument-Information.

URL <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/Aura/additional/documentation/README.OMI-DUG.pdf> (OzoneMonitoringInstrument(OMI)DataUser’sGuide);http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/omi_snapshot.shtml

NASA-OMI(b), (26.02.2013). OMI Instrument-Information.

URL <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>

NASA-SABER, (26.02.2013). SABER Instrument Information.

URL <http://wdc.dlr.de/sensors/saber/>

NASA-TOMS, (26.02.2013). TOMS Instrument-Information.

URL <http://science.nasa.gov/missions/nimbus/>; <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/m3sat.md>; <http://science.nasa.gov/missions/adeos/>; <http://science.nasa.gov/missions/toms> <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/acdisc/TOMS>

Naujokat, B., 2005. Variabilität in der Stratosphäre: Die QBO. In: Promet, Meteorologische Fortbildung Mittlere und obere Atmosphäre. Jahrgang 31 Heft 1, Nr. 5, S.1873-1877.

NDMC-GRIPS, (26.02.2013). GRIPS Instrument Information.

URL http://www.dlr.de/eoc/desktopdefault.aspx/tabcid-5380/10669_read-24062/

Nimbus-7, (26.02.2013). Nimbus-7 Satellit-Information.

URL <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftOrbit.do?id=1978-098A>; <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/experimentDisplay.do?id=1978-098A-09>

Pascoe, C. L., Gray, L. J., Crooks, S. A., Juckes, M. N., Baldwin, M. P., 2005. The Quasi-Biennial Oscillation: Analysis using ERA-40 data. In: Journal of Geophysical Research. Ausgabe 110, Nr. D08105.

Pilcher, H., 1986. Dynamik der Atmosphäre. u. a. Bibliographisches Institut - Mannheim.

Ruzmaikin, A., Feynman, J., Juang, X., Yung, Y. L., 2005. Extratropical signature of the quasi-biennial oscillation. In: Journal of Geophysical Research. Ausgabe 110, Nr. D11111 (doi:10.1029/2004JD005382).

Schmidt, C., Höppner, K., Bittner, M., 2013. A ground-based spectrometer equipped with an InGaAs array for routine observations of OH(3-1) rotational temperatures in the mesopause region. In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. (eingereicht).

- Schneider, R., 2009. Untersuchung des Einflusses planetarer Wellen auf stratosphärische Erwärmung und Ozonstreamer. Diplomarbeit - Universität Augsburg.
- Schönwiese, C.-D., 2003. Klimatologie. Verlag Eugen Ulmer - Stuttgart, 2. Auflage.
- Shepherd, T. G., 2007. Transport in the middle Atmosphere. In: Journal of Meteorological Society of Japan. Ausgabe Nr. 85B, S. 165-191.
- Weltkarte, (02.04..2013).
URL <http://www.deine-wandtattoos.de/weltkarte-mit-laendergrenzen.html>
- Wüst, S., 2005. Exemplarische Untersuchung nicht-linearer Wechselwirkungen zwischen atmosphärischen Schwerewellen (Triade) anhand von raketengestützten Winddaten (Chaff). Diplomarbeit - Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg.
- Wüst, S., Bittner, M., 2011. Resonant interaction between two planetary waves with zonal wave number two? In: Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. Ausgabe 73 (7-8), S. 771-778 (doi: 10.1016/j.jastp.2011.01.004).

Johanna Schack

10.04.1990

Studiengruppe 7W im Sommersemester 2013

München, den 13.05.2013

Erklärung

gemäß § 35 Abs. 7 RaPO

Hiermit erkläre ich, dass ich die Bachelorarbeit selbstständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt, sowie wörtliche und sinngemäße Zitate als solche gekennzeichnet habe.

(Johanna Schack)