

# Dokumentation für MUAM

Autoren:

Friederike Lilienthal

Amelie Krug

Franziska Hellmuth

Roxana Cremer

Letzte Änderung: Friederike Lilienthal

Stand: 7. Juni 2016

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Bedienungsanleitung</b>	<b>7</b>
2.1	Anleitung zum 1. Start . . . . .	7
2.2	Start von außerhalb des CIP-Pools . . . . .	8
<b>3</b>	<b>muam_month und imake_48</b>	<b>10</b>
3.1	imake48.sh . . . . .	10
3.2	muam_month.sh . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Die Steuerdatei MUAM_MOD</b>	<b>12</b>
4.1	Allgemein . . . . .	12
4.2	Erklärung der Namelists . . . . .	13
4.2.1	&RUN Laufzeit . . . . .	13
4.2.2	&INI Initialisierung . . . . .	14
4.2.3	&FDX Ausgabedateien . . . . .	14
4.2.4	&LOB Lower Boundary . . . . .	16
4.2.5	&FOR Forcing of Planetary Waves . . . . .	17
4.2.6	&PWS Planetary Waves . . . . .	18
4.2.7	&PWX Zonale Wellenzahl der Planetaren Wellen . . . . .	18
4.2.8	&PWP Periodendauer planetarer Wellen . . . . .	19
4.2.9	&PWF Planetare Wellen - Amplituden . . . . .	19
4.2.10	&GRW Gravity Waves . . . . .	20
4.2.11	&SOL Sonne und Chemie . . . . .	20
<b>5</b>	<b>(Unter-)Programme in MUAM</b>	<b>23</b>
5.1	Übersicht . . . . .	23
5.2	model_48.f . . . . .	25
5.3	open_60.f . . . . .	26
5.4	O3model_Berlin_60.f . . . . .	27
5.5	species_60.f . . . . .	30
5.6	init_60.f . . . . .	30
5.7	fourier_matrix.f . . . . .	31
5.8	fourier_filter_lb.f . . . . .	31
5.9	irc_60.f . . . . .	31
5.10	CCO2GR.f . . . . .	33
5.11	geopot_60.f . . . . .	33

5.12	vbew.f . . . . .	34
5.13	grwaves_RSHU.f . . . . .	34
5.14	acc_ASM.f . . . . .	37
5.15	egwd_RSHU.f . . . . .	37
5.16	strobels60.f . . . . .	40
5.17	ircool60.f . . . . .	43
5.18	plwaves_LIM.f . . . . .	46
5.19	tendenz60_1.f . . . . .	46
5.20	tendenz60_a.f . . . . .	46
5.21	molcon60_1.f . . . . .	49
5.22	ncool_PWs60.f . . . . .	49
5.23	bi_diff60.f . . . . .	49
5.24	legandr_philb.f . . . . .	49
5.25	fourier_filter.f . . . . .	49
5.26	levy.f . . . . .	50
5.27	externe Subroutines . . . . .	50
5.27.1	SVD . . . . .	50
5.27.2	INVSVD . . . . .	50
5.27.3	POLLEG . . . . .	50
5.27.4	FILTER . . . . .	50
5.27.5	PRMV . . . . .	50
5.27.6	PRVV . . . . .	51
5.27.7	A18INT . . . . .	51
5.27.8	SPLINE . . . . .	51
5.27.9	ADAPT . . . . .	51
5.27.10	SEVAL0 . . . . .	51
<b>6</b>	<b>Datafiles</b>	<b>52</b>
6.1	data_GH_SPW.f . . . . .	52
6.2	data_H2O.f . . . . .	52
6.3	data_irc_LIM.f . . . . .	52
6.4	data_newCO2.f . . . . .	53
6.5	data_strobels.f . . . . .	53
6.6	data_TMP_SPW.f . . . . .	53
6.7	param_grid60.f . . . . .	53
6.8	pco2o3.f . . . . .	54
6.9	udssr.f . . . . .	54
6.10	TSMo3_v02.data . . . . .	54

<b>7 Arbeit mit der Shell, Shellskripte</b>	<b>56</b>
7.1 Einstieg Shell . . . . .	56
7.2 Kommandozeilenbefehle . . . . .	56
7.3 Bash-Skripte . . . . .	60
7.4 screen: Rechnen im Hintergrund . . . . .	64
7.4.1 Die wichtigsten Befehle . . . . .	64
7.4.2 Weitere Befehle . . . . .	65
7.5 Die wichtigsten Konsolenbefehle zusammengefasst . . . . .	66
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>

# 1 Einleitung

## Was ist MUAM?

Das „Middle and Upper Atmosphere Model“ (MUAM; Pogoreltsev et al., 2007) ist ein nichtlineares mechanistisches 3D Gitterpunktsmodell der neutralen atmosphärischen Zirkulation mit einer Auflösung der Breitengrade von  $5^\circ$  und der Längengrade von  $5.625^\circ$ . Modelliert wird dabei in logarithmischen Druckkoordinaten  $z = -H \ln p/p_0$  mit einer Skalenhöhe  $H$  von 7 km und einem Bodenreferenzdruck  $p_0$  von 1000 hPa. Der vertikale Gitterabstand beträgt in logarithmischen Druckkoordinaten 2.842 km. Für die dimensionslose Höhe  $x = \ln p/p_0$  entspricht dies einem Wert von ungefähr 0.4. Insgesamt lassen sich zwischen 48 und 60 Höhenschichten implementieren, wobei der dimensionslose vertikale Gitterabstand konstant bleibt. In der 60-Level-Version liegt der Oberrand bei  $x = 24$ , was einer geopotentieller Höhe von etwa 300 – 400 km entspricht, abhängig von der thermosphärischen Temperatur (Pogoreltsev et al., 2007, siehe auch Abb. 1, Mitte und rechts).

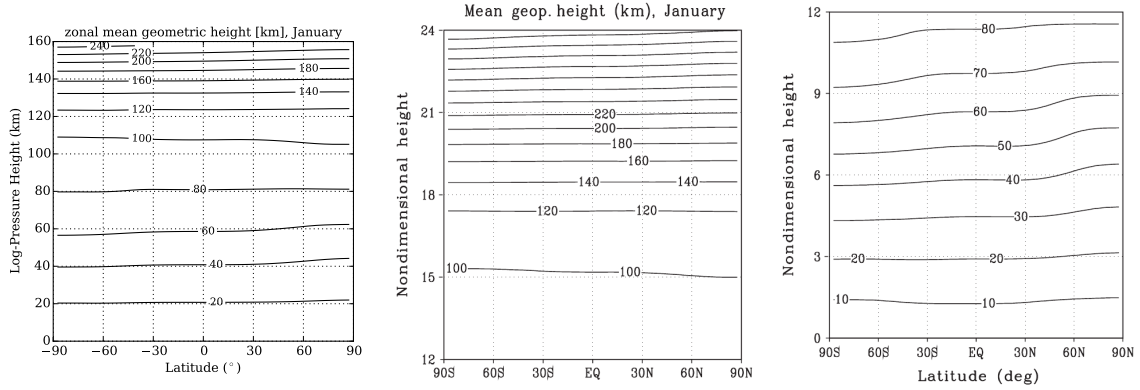
Aktuell reicht das Modell in 56 Höhenschichten bis 160 km log-p-Höhe. Die logarithmische Druckhöhe  $z$  entspricht der geometrischen Höhe in einem Bereich von rund 80 km bis 95 km und überragt diese in 95 km bis 120 km um bis zu 5 km (Fytterer et al., 2014). Am aktuellen Modelloberrand beträgt die geometrische Höhe ca. 240 km, was einer Differenz von etwa 80 km zur logarithmischen Druckhöhe entspricht. Dies ist in Abb. 1, links, dargestellt.

In der unteren Atmosphäre (bis  $z = 30$  km) wird das Modell durch assimilierte Reanalysen in der zonal gemittelten Temperatur angetrieben. In einem sogenannten „Nudgingterm“ werden die Modellergebnisse damit in Richtung der troposphärischen Modelle gelenkt. Es können aktuell NCEP- oder ERA-Interim Reanalysedaten eingebunden werden. Ausgehend von diesen Daten werden zusätzlich am Unterrand (1000 hPa) die Amplituden und Phasen der ersten drei harmonischen Anteile in Geopotential und Temperatur berechnet.

Die zeitliche Auflösung des Modells beträgt bei 56 Höhenschichten 225 s, also 16 Zeitschritte pro Stunde. Dies kann jedoch über die Namelist geändert werden (siehe Kapitel 4). So werden z.B. für 48 Höhenschichten nur 450 s benötigt. Dies liegt in der numerischen Stabilität begründet. Die numerische Integration der Zeitschritte folgt einem Schema nach Matsuno (1966), welches ein Euler-Forward- sowie ein Euler-Backward-Verfahren kombiniert.

## Woher kommt es?

MUAM basiert auf dem „Cologne Model of the Middle Atmosphere – Leipzig Institute for Meteorology“ (COMMA-LIM) und wurde in Zusammenarbeit der Universität Leipzig mit der Russian State Hydrometeorological University (RSHU) in St. Petersburg fortlaufend weiterentwickelt.



**Abb. 1:** Darstellung der geometrischen Höhe gegenüber der logarithmischen Druckhöhe (in 56 Höhenschichten; links). Geopotentielle Höhe gegenüber der dimensionslosen Höhe  $x = -\ln p/p_0$  (in 60 Höhenschichten; Mitte und rechts). Letztere entnommen aus Pogoreltsev et al. (2007).

Nähere Informationen zu COMMA-LIM finden sich in Fröhlich (2005), Kapitel 3: COMMA basiert auf einem hemisphärischen Modell für die Stratosphäre und Mesosphäre und wurde von Rose (1983) entwickelt. Jakobs (1986) erweiterte die vertikale Ausdehnung bis in eine geometrische Höhe von 150 km und fügte den Ion Drag, die molekulare Wärmeleitung, die dynamische Viskosität, sowie die Dissipation aufgrund brechender Schwerewellen hinzu. Des Weiteren wurde von Berger (1994) eine Strahlungs-Subroutine für solare Erwärmungsraten und Infrarotkühlung hinzugefügt. Damit konnten im Modell Gezeiten selbstkonsistent angeregt werden. In Köln wurde COMMA für Studien der Chemie in der mittleren Atmosphäre genutzt und dahingehend erweitert.

Seit der Umbenennung von COMMA in MUAM gab es viele weitere Neuerungen. Einige davon seien hier genannt:

- Ablösung des alten Zeitschrittverfahren (Leapfrog) durch ein Matsuno-Schema
- 2014: Aktualisierung der Ozonklimatologie in Hinsicht auf einzelne Jahre auf der Grundlage von SPARC oder MERRA; dabei aber Verlust der Beachtung des 2. Ozonmaximums
- 2014: Aktualisierung des globalen Kohlendioxidwertes in Hinsicht auf einzelne Jahre auf der Grundlage von Messdaten am Mauna-Loa-Observatorium
- Variation der unteren Randbedingungen (früher UKMO, später NCEP, ab 2014 ERA-Interim)
- 2014: Erweiterung von 48 Schichten auf 56 Schichten mit zusätzlicher Schwerewellenparametrisierung für die Thermosphäre (nach Yigit et al., 2008)
- 2016: neue Version von RSHU mit latenter Wärme, El Niño/La Niña Bedingungen, orogra-

phischen Schwerewellen, 3D Wasserdampf und Ozon

Neben MUAM gibt es weitere mechanistische Modelle und Modelle der atmosphärischen Gesamtzirkulation. Beispiele sind (Hoffmann, 2011):

- das „Global Scale Wave Model“ (GSWM; Hagan und Forbes, 1995)
- das „Thermosphere Ionosphere Mesosphere Electrodynamic- GCM“ (TIME-GCM; Roble und Ridley, 1994)
- das „Canadian Middle Atmosphere Model“ (CMAM; Fomichev et al., 2002)
- das „HAMburg MOdel of the Neutral and Ionized Atmosphere“ (HAMMONIA; Schmidt et al., 2006)
- das „Leibniz-Institute Middle Atmosphere model“ (LIMA; Berger, 2008)
- das „Whole Atmosphere Community Climate Model“ (WACCM; Marsh et al., 2013)
- das „Icosahedral Nonhydrostatic model at the Institute for Atmospheric Physics“ (ICON-IAP; Gassmann, 2013)
- sowie das „Kühlungsborn Mechanistic general Circulation Model“ (KMCM; Becker, 2009).

## 2 Bedienungsanleitung

### 2.1 Anleitung zum 1. Start

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Ordnerstruktur von MUAM. Für den ersten Start sind v.a. `mak` (Datei `muam_month.sh`) und `run` (Datei `muam_mod_clear.txt`) von Bedeutung. Um einen ersten Lauf zu starten, müssen folgende Schritte abgearbeitet werden:

1. Loggen Sie sich auf einem Computer im CIP-Pool mit ihrem Uniaccount ein (pge...) und nutzen Sie dann die ora-linux-Verbindung. Melden Sie sich dort über ihren Arbeitsplatz an (z.B. Benutzer: `ap2_01`). Merken Sie sich diesen Arbeitsplatz, denn in Zukunft müssen Sie sich immer darüber anmelden!
2. Öffnen Sie ein Terminalfenster und geben Sie folgendes ein:

Wechseln in den arbeitsplatzeigenen Ordner (statt `ap2_01` Ihren Arbeitsplatz):

```
ap2_01@ora:~$ cd /home_local/ap2_01/
```

Kopieren des MUAM-Ordners aus `gemeinsam_tmp` nach hier (Punkt!):

```
ap2_01@ora:~$ cp -r /home_local/gemeinsam_tmp/dynamik_ma/muam_version0/ .
```

MUAM-Ordner umbenennen (statt `mmustermann` Ihren Namen):

```
ap2_01@ora:~$ mv -r muam_version0/ muam_mmustermann/
```

Nun liegt auf ihrem Arbeitsplatz ihr eigener MUAM-Ordner.

3. Öffnen Sie die Datei `muam_month.sh` im Unterordner `mak`. Geben Sie dort den zu rechnenden Monat und die Rechenabschnitte ein (Details siehe Kapitel 3). Speichern nicht vergessen.
4. Öffnen Sie die Steuerdatei `muam_mod_clear.txt` im Unterordner `run`. Hier können diverse Einstellungen vorgenommen werden (Details siehe Kapitel 4). Für den Anfang sind besonders die planetaren Wellen hervorzuheben, welche in der Namelist PWS mit 1 (0) angeschalten (ausgeschalten) werden können. Speichern nicht vergessen.
5. Im Ordner `run` liegt das Pythonskript `muam2netcdf.py`. Prüfen Sie hier die angegebenen Dateipfade und passen Sie diese ggf. auf Ihre persönliche Ordnerstruktur an.
6. MUAM ist jetzt für den Start vorbereitet. Öffnen Sie ein Terminalfenster.  
(OPTIONAL) Will man MUAM im Hintergrund rechnen lassen, so sollte man dies über die Server tun. Mögliche Servernamen sind: `barat`, `monsun`, `mistral`, `bora`. Geben Sie dafür den Befehl `benutzer@Rechner:~$ ssh barat` ein, gefolgt von Ihrem Passwort und **ENTER**.



Nutzen Sie nun die screen-Umgebung (siehe Abschnitt 7.4): `benutzer@Rechner:~$ screen`, wodurch sich ein virtuelles Terminalfenster öffnet.

7. Wechseln Sie mithilfe von `cd` in den Ordner, wo sich die Datei `muam_month.sh` befindet. Geben Sie zum Starten ein: `benutzer@Rechner:~$ ./muam_month.sh` oder `benutzer@Rechner:~$ ./muam_month.sh >ausgabe.txt`, falls die Ausgabe in einer Extradatei gespeichert werden soll.
8. (falls Sie über SSH und Screen gestartet haben...) ist mit Strg+a+d die Abmeldung vom Screen möglich, gefolgt von der Eingabe `Exit`, welche die SSH-Verbindung schließt. MUAM ist nun im Hintergrund aktiv.
9. Warten Sie die Rechnung ab, bis alle gewünschten nc-Dateien erstellt sind (das kann je nach Anzahl der Monate dauern!)
10. Kopieren Sie die Pythonskripte aus dem Unterordner `pyt` zur Auswertung der nc-Dateien (z.B. Höhen-Breiten-Schnitte) in den gleichen Ordner. Prüfen Sie in den Skripten die Dateinamen (Monatskennung) und zeitlichen Auflösungen (`nt=12` für 2h, `nt=6` für 4h). Gestartet werden die Skripte über `benutzer@Rechner:~$ python script.py`. Die Ergebnisse werden als PDF im gleichen Ordner abgelegt.

## 2.2 Start von außerhalb des CIP-Pools

1. Wenn Sie nicht im Studentenwohnheim wohnen, müssen Sie sich zunächst per VPN ins Netzwerk einloggen. Wie das geht, ist hier beschrieben
2. (Nur Linux) Man baut eine SSH-Verbindung mit dem Server am CIP-Pool auf, Benutzer ist der entsprechende Arbeitsplatz: `benutzer@homePC:~$ ssh -X ap2_01@139.18.170.210`  
Daraufhin folgt eine Passwortabfrage und Sie können sich innerhalb der Konsole frei bewegen. Die Nutzung grafischer Oberflächen wie Kate ist nicht empfehlenswert, da die Datenübertragung zu lange dauert. Besser ist es, hier Joe zu verwenden.
3. Das Kopieren von Dateien vom heimischen PC zum CIP-Pool erfolgt über `benutzer@homePC:~$ scp datei.dat ap2_01@139.18.170.210:/Pfad/datei.dat` (und umgekehrt)

# MUAM

dat	ini	low	mak	pyt	run	src
<b>xconv1.91</b> → ermöglicht die Daten der nc-Dateien zu begutachten (auch plotting)  sonst: Ablageordner für Ergebnisse	Initialisierungsdatei- en für jeden Monat Jan-Dez für Zeitabschnitt 0  → enthalten Temperatur- und Windprofile  Name: <b>"f2.0_mon_new"</b> (für mon 3 Buchstaben, engl. z.B. Oct)	→ lower boundary  NCEP: - Ordner: <b>ncep_lb_jahr_mon</b> - Jahr: 4-stellig, z.B. 2002 - Mon: 3 Buchstaben, engl. z.B. Oct - low_decade: Monate je über 2000-2011 gemittelt  ERA-Interim: low_era Ordner <b>era_jahr_mon</b> z.B. <b>era_1989_01</b>	<b>imake48.sh</b> , <b>muam_month.sh</b>  Shellskripte zum Start von MUAM und für weitere Auswerterroutinen → Details siehe Kapitel 3+7	enthält diverse Plotting- Programme für nc-Dateien z.B. Höhen-Breiten- Schnitte für Gezeiten und für Hintergrund	→ enthält alle aktuell verwendeten Dateien für einen Lauf, das ausführbare muam48- Programm und ein Python-Programm zur Erstellung der nc-Dateien  → ganz wichtig: <b>muam_mod_clear.txt</b> (Steuerdatei)	Quelldateien von MUAM (Fortrancode) → <b>model48.f</b> ist Hauptprogramm → weitere Unterprogramme für z.B. Schwerewellen, solare Erwärmung, etc.  ↓  Diesen Ordner nach Möglichkeit nicht antasten!

**Tabelle 1:** Ordnerstruktur von MUAM. Das MUAM-Paket besteht aus 4 Ordnern, die möglichst beibehalten werden sollten. Nach Belieben zusätzliche Ordner einzufigen ist jedoch kein Problem.

### 3 muam\_month und imake\_48

Im MUAM-Ordner `mak` liegen zwei fertige Shellskripte, die MUAM steuern und starten: `imake48.sh` und `muam_month.sh`. Ersteres dient der Kompilierung des Codes, letzteres der Einstellung von Parametern, welche in die `muam_mod.txt` geschrieben werden sollen. `imake48` wird in `muam_month` direkt aufgerufen, sodass lediglich das `muam_month`-Skript zum Start von MUAM aus einer Shell heraus mit dem Befehl `benutzer@Rechner:~$ ./muam_month.sh` gestartet werden muss. Im folgenden werden lediglich diejenigen Befehle erklärt, die in Kapitel 7 nicht näher erläutert werden.

#### 3.1 imake48.sh

<code>ifort</code>	startet den Intel-Fortran-Compiler (Details hier)
<code>-fpe0</code>	Ausgabe von Fehlermeldungen: Overflow (zu große Zahlen), Teilen durch Null und nicht erlaubte Fließkommazahlen. Programm bricht bei Fehler ab und gibt entsprechende Fehlermeldung aus. Bei Underflow (zu kleine Zahlen): Ergebnis wird auf Null gesetzt, Programm läuft weiter
<code>-traceback</code>	gibt bei Fehlermeldungen Name der Subroutine sowie die Zeile im Programm aus
<code>-c</code>	verhindert Verlinkung zwischen den nachfolgenden Quellcodes, erzeugt Objektdateien mit der Endung <code>.o</code> (hier entsteht keine ausführbare Datei!)
<code>-g</code>	erzeugt Debug-Informationen
<code>-o</code>	erzeugt ausführbare Datei, der Name der Datei steht danach als erstes, dann folgen die zu kompilierenden Programme
<code>ar</code>	erzeugt eine Archivdatei mit nachfolgendem Namen (hier: <code>muamlib.a</code> )
<code>-q</code>	schnelles anhängen, ohne Test auf Ersetzen, neue Dateien werden einfach hinten angehängt
<code>-r</code>	anhängen mit Ersetzen, falls Namensgleichheit

## 3.2 muam\_month.sh

Zu Beginn der `muam_month.sh` werden die Ordner für die Ergebnisdateien des Modelllaufs von MUAM erzeugt, jeweils dem aktuellen Datum angepasst. Als nächstes wird über `cd ../run/` in den run-Ordner gewechselt, um anschließend das in Abschnitt 3.1 erklärte Shell-Skript zum Kompilieren des Quellcodes auszuführen. Anschließend können über eine For-Schleife die Monate ausgewählt werden für die MUAM rechnen soll. Um einen jahreszeitlichen Verlauf realistisch wiederzugeben benötigt MUAM als untere Grenzbedingung entsprechende Reanalysedaten für die jeweiligen Monate (siehe Kapitel 1). Diese werden über `cp ../low/era_2002-2012_$im/*.dat` in den run-Ordner kopiert. Danach wird mithilfe einer For-Schleife über die Variable `sec` festgelegt, in welchen Rechenabschnitten gerechnet werden soll.

Im nächsten Abschnitt des Shell-Skriptes wird mithilfe eines shell-Befehls die Muam-mod-Datei manipuliert und die einzelnen Variablen `NEND`, `NDEK` etc. auf den aktuellen Rechenabschnitt angepasst. Dies dient der Automatisierung, denn ohne diese Manipulation müsste immer wieder für jeden Rechenabschnitt (Tag 0 bis 120, Tag 120 bis 180 etc.) per Hand eine extra `muam_mod.txt` geschrieben werden. Der „`sed`“-Befehl funktioniert dabei wie folgt:

```
sed -i -e 's/ NEND = xxxxx/ NEND = '$nend'/g' muam_mod$sec.txt
sed -i -e 's/ NDEK = xxx/ NDEK = '$j'/g' muam_mod$sec.txt
sed -i -e 's/ GWAM = xxx/ GWAM = '$im'/g' muam_mod$sec.txt
sed -i -e 's/ FOLD = "xxxxxxxxxxxxxx"/ FOLD = "'$fold'"/g' muam_mod$sec.txt
sed -i -e 's/ FNEW = "xxxxxxxxxxxxxx"/ FNEW = "'f2_"$sec$u$im$add1'"/g' muam_mod$sec.txt
sed -i -e 's/ FUVT = "xxxxxxxxxxxxxx"/ FUVT = "'$uvt"$sec$u$im$add1".dx'"/g' muam_mod$sec.txt
if [ $sec == '360' ] then
    sed -i -e 's/ NOUT = xx/ NOUT = 8/g' muam_mod$sec.txt
else
    sed -i -e 's/ NOUT = xx/ NOUT = 32/g' muam_mod$sec.txt
fi

cp muam_mod$sec.txt muam_mod.txt
```

Die Option `-i` des `sed`-Befehls ermöglicht, dass die Änderung direkt in der selben Datei vorgenommen wird und nicht eine neue Datei erzeugt werden muss<sup>1</sup>. Die Option `-i` verwendet man beim Gebrauch mehrerer `sed`-Befehle. Bei der Verwendung von nur einem `sed`-Befehl kann sie weggelassen werden. Sie zeigt an, dass mit dem nächsten Befehl die Datei bearbeitet wird. Dies geschieht über `'s/alter Text/neuer Text/g'`. Hierbei bedeutet `g` „global“, d. h. es das zu ändernde Wort (`alter Text`) wird in der gesamten Datei an allen Stellen durch (`neuer Text`) ersetzt und nicht nur das erste Auftreten in einer Zeile. `x` ist dabei ein Platzhalter. Als letztes wird noch benannt in welcher Datei die Änderung vorgenommen werden soll. In unserem obigen Beispiel ist dies die `muam_mod$sec.txt`. Analog dazu werden auch die Python-Auswerteprogramme angepasst. Weitere Details zum Befehl `sed` sind in Abschnitt 7.3 zu finden.

---

<sup>1</sup>Tatsächlich geschieht dies dann im Hintergrund, indem eine temporäre Datei angelegt wird.

## 4 Die Steuerdatei MUAM\_MOD

### 4.1 Allgemein

Die MUAM-MOD-Datei ist eine Namelist für das Fortranprogramm MUAM, welche in einer externen Datei steht. **\*MUAM120\*** steht dafür, dass das Programm 120 Tage zum Einschwingen benötigt und dabei eine Grundstruktur ausbildet, beachtet werden planetare Wellen oder Gezeiten. MUAM berechnet in der Voreinstellung die ersten 120 Tage (kann aber auch verändert werden), danach rechnet es bis 180 usw. (120, 180, 240, 300, 330, 360). Diese Blöcke benötigen immer eine neue MUAM-MOD-Datei, in der das Ende des jeweiligen Blocks vorgegeben wird. Der Ausgang ergibt sich automatisch durch Einbinden des letzten gespeicherten Zustandes in FOLD. Der berechnete letzte Zeitschritt eines Blockes wird immer in FNEW gespeichert. Das heißt eine aktuelle FNEW wird im nächsten Block zu FOLD. Ab dem 330. Tag wandert in der Voreinstellung zusätzlich die Sonne, d.h. die Deklination ändert sich von Tag zu Tag.

Eine NAMELIST in Fortran besteht aus Gruppen, die durch ein "&" eingeleitet werden, gefolgt vom Gruppennamen. Am Ende einer jeden Gruppe muss ein "/" stehen, zwischen den einzelnen Gruppenelementen ein ",". z.B.

```
&RUN  
NPHI = 46080 ,  
NEND = 46080 ,  
NPRINT = 384 ,  
NOUT = 64 ,  
NTIME = 16 ,  
KRET = 0 ,  
NSUN = 126720 ,  
NDEK = 1 ,  
YEAR = 2005 /
```

## 4.2 Erklärung der Namelists

### 4.2.1 &RUN Laufzeit

legt die Auflösung der Zeitschritte und der zu speichernden Ausgaben fest und bestimmt den Start von Routinen.

NPHI = 46080	Einsetzen der planetaren Wellen (nach 120 Tagen, Berechnung: $\text{NTIME} \cdot 120d \cdot 24h = \text{NPHI}$ ) betrifft Routine <code>plwaves_LIM.f</code>
NEND = 46080	letzter Zeitschritt des zu berechnenden Blocks (nach 120 Tagen)
NPRINT = 384	Anzahl der Zeitschritte pro Tag, Länge des Zeitschritts sind 450s, (Berechnung: $\frac{24h \cdot 60min \cdot 60s}{450s} = \text{NPRINT}$ )
NOUT = 64	zeitliche Auflösung (in Zeitschritten) zur Ausgabe der Daten (Berechnung: $\text{NTIME} \cdot \text{“zeitliche Auflösung in h“} = \text{NOUT}$ , z.B. $\text{NOUT} = 64 \rightarrow$ alle 4h, $\text{NOUT} = 32 \rightarrow$ alle 2h)
NTIME = 16	Anzahl der Zeitschritte pro Stunde (Berechnung: $\Delta t = \frac{3600}{\text{NTIME}}$ NTIME ist so zu wählen, das $\Delta t$ eine ganze Zahl ist, z.B. $\Delta t = 225s$ bei $\text{NTIME} = 16$ )
KRET = 0	Inhalt der Speicherdatei FNEW: -1 (kein sichern), 0 (letzten Schritt sichern), +1 (jeden Tag sichern)
NSUN = 125720	Einsetzen der Sonnenwanderung betrifft Routine <code>strobels_60.f</code> (nach 330 Tagen, Berechnung: $\text{NTIME} \cdot 330d \cdot 24h = \text{NSUN}$ )
NDEK = 1	Tag des Jahres für den 1. des zu rechnenden Monats, z.B. 1. Januar = 1, 1. Februar = 32, 1. März = 60, 1. April = 91, 1. Mai = 121, 1. Juni = 152, 1. Juli = 182, 1. August = 213, 1. September = 244, 1. Oktober = 274, 1. November = 305, 1. Dezember = 335, wichtig zur Berechnung der Deklination, siehe NSUN
YEAR	Jahr, für welches Ozon und CO <sub>2</sub> -Daten eingebunden werden.

### 4.2.2 &INI Initialisierung

Sind alte und neue Speicherdateien zum weiter rechnen und Ozondaten. Alle Dateinamen müssen aus 14 Zeichen bestehen.

FOLD = \XX_XXX_XXX_new\	In dieser Datei ist der letzte Zeitschritt des zuvor berechneten Abschnittes gespeichert. Sie enthält die Variablen: an0, an1, an2, philb0, philb1, fphi_0 und ken1 sowie ggf. diff3 und diff1b (abhängig von der Version). Für den 0. Zeitschritt liegt ein Standard-Temperaturprofil sowie ein Horizontalwind von null zugrunde.
FNEW = \XX_XXX_XXX_tst\	Diese Datei wird als neue Datei erzeugt und in diese wird der letzte Zeitschritt eines aktuellen Blocks geschrieben (falls KRET = 0). Diese Datei eignet sich als Speicherpunkt zum Weiterrechnen (zum Beispiel bei Neurechnung eines Monats mit gleicher Einstellung in der Einschwingphase).
F03 = \TSMo3_v02.data\	Diese Datei enthält monatsweise Ozonprofile (2D) nach dem Modell der FU Berlin (siehe auch Abschnitt 5.4). Sie sollte nicht gelöscht werden.
FC02 = \co2_monthly.txt\	Monatliche Mittel von CO <sub>2</sub> Daten der Jahre 1975 bis 2013.

### 4.2.3 &FDX Ausgabedateien

Ausgabedateien nach einem Block (.dx = binäre Dateien, um diese ansehen zu können sind spezielle Tools notwendig!)

FUVT = \uvtXXX_XXX_XXX.dx\	Der Dateiname muss 17 Zeichen lang sein. Enthält den Horizontalwind (u,v) und die Temperatur (t)
-------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------

FPHI = \phi.dx\	Der Dateiname muss aus 6 Zeichen bestehen. Datei des Geopotentials.
-----------------	---------------------------------------------------------------------

Die folgenden Dateien müssen einen 7 Zeichen langen Dateinamen haben.

FVER = \wvel.dx\	Vertikalgeschwindigkeit
FGFU = \gwfu.dx\	Schwerewellen, zonaler (u) Fluss (f)
FGFV = \gwfv.dx\	Schwerewellen, meridionaler (v) Fluss (f)
FGAU = \gwau.dx\	Schwerewellen, zonale (u) Beschleunigung (a)
FGAV = \gwav.dx\	Schwerewellen, meridionale (v) Beschleunigung (a)



#### 4.2.4 &LOB Lower Boundary

Dateien für Randbedingungen am Boden, sie kommen aus anderen Modellen wie z.B. NCEP oder ERA-Interim

TLB = \T_lower.dat\	Datei ist aufgeteilt in geogr. Breite (-87.5°bis 87.5°) — Höhe (km) — zonales Mittel der Temperatur. Der Dateiname muss 11 Zeichen lang sein.
---------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Die folgenden Dateien müssen einen 13 Zeichen langen Dateinamen haben.

T00 = \T0_1000mb.dat\	die Bezugshöhe ist bei 0km, Datei ist aufgeteilt in geogr. Breite — Höhe (= 0km, 1000 hPa) — zonales Mittel der Temperatur (z.B. T=288K)
T11 = \T1_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 1. harmonische Schwingung der Temperatur: stationäre Welle der Wellenzahl 1
T22 = \T2_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 2. harmonische Schwingung der Temperatur: stationäre Welle der Wellenzahl 2
T33 = \T3_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 3. harmonische Schwingung der Temperatur: stationäre Welle der Wellenzahl 3
G00 = \g0_1000mb.dat\	die Bezugshöhe ist bei 0km, Datei ist aufgeteilt in geogr. Breite — Höhe(=0km) — zonales Mittel des Geopotentials (z.B. $g=2.6057e+4 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ )
G11 = \g1_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 1. harmonische Schwingung des Geopotentials: stationäre Welle der Wellenzahl 1

G22 = \g2_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 2. harmonische Schwingung des Geopotentials: stationäre Welle der Wellenzahl 2
G33 = \g3_1000mb.dat\	Datei enthält geogr. Breite — Amplitude — Phase für 3. harmonische Schwingung des Geopotentials: stationäre Welle der Wellenzahl 3

#### **4.2.5 &FOR Forcing of Planetary Waves**

Mögliche Einstellungen für Forcing- (Anregungs-) Terme

MFORC = 2	(1) nur stationäre Wellen (aus LOB), (2) mit planetaren Wellen (aus PWS)
MUVIR = 2	(0) keine UV-Erwärmung, keine IR-Kühlung, (1) UV-Hitze nur Strobel-Routine, (2) für UV-Erwärmung und IR-Kühlung (d.h. strobel_60.f und ircool_60.f)
MIOND = 2	(0) keine Rayleigh-Reibung und kein Ion-Drag, (1) nur background Rayleigh, (2) background Rayleigh und Ion-Drag
LODEF = 1	(0) keine Lorentz-Ablenkung, nur normale Corioliskraft, (1) Lorentz-Ablenkung wirkt entgegen der Corioliskraft

#### 4.2.6 &PWS Planetary Waves

Enthält verschiedene Wellen, die optional durch einen zusätzlichen Erwärmungsterm angeregt werden können. Hier stehen die letzten beiden Zeichen für den Wellentyp. Mit “X=0“ sind die jeweiligen Wellen aus bzw. mit “X=1“ angeschaltet.

I_2d = X	Quasi-2-Tage-Welle
I_SK = X	Slow-Kelvin
I_KW = X	Ultrafast-Kelvin
I_FK = X	Fast-Kelvin
I_NK = X	Normal-Mode-Kelvin
I_10 = X	Normalmode
I_11 = X	5-Tage-Welle
I_12 = X	10-Tage-Welle
I_13 = X	15-Tage-Welle
I_21 = X	4-Tage-Welle
I_23 = X	15-Tage-Welle anderer Wellenzahl

Nähere Einstellung zu Wellenzahlen, Periodendauern und Amplituden folgen in PWX, PWP und PWF

#### 4.2.7 &PWX Zonale Wellenzahl der Planetaren Wellen

Die Wellenzahl errechnet sich indem man sich überlegt “wie viele Wellen auf den Erdradius passen“.

Die Wellenzahlen gehen als real in die Rechnung ein, also “.“ nicht vergessen!

Xm2d = 3.	k=3 der Quasi-2-Tage-Welle
XmSK = 1.	k=1 der Slow-Kelvin
XmFK = 1.	k=1 der Fast-Kelvin
XmKW = 1.	k=1 der Ultrafast-Kelvin
XmNK = 1.	k=1 der Normal-Mode-Kelvin
Xm10 = 1.	k=1 der Normalmode
Xm11 = 1.	k=1 der 5-Tage-Welle
Xm12 = 1.	k=1 der 10-Tage-Welle
Xm13 = 1.	k=1 der 15-Tage-Welle
Xm21 = 2.	k=2 der 4-Tage-Welle

Xm23 = 2.	k=2 der 15-Tage-Welle mit anderer Wellenzahl
-----------	----------------------------------------------

#### 4.2.8 &PWP Periodendauer planetarer Wellen

Die Ausbreitungsrichtung ist ostwärts, wenn ein “+“ davor steht, ansonsten westwärts mit einem “-“. Alle angegebenen Periodendauern (T) sind in Sekunden, also  $\frac{Zahl}{3600s} = h$ . Die Periodendauer ist meist nach Longuet-Higgins (1968) festgelegt (siehe auch Pogoreltsev et al., 2014).

Per_2d = -189.0E+3	T=52.5h der 2-Tage-Welle
Per_SK = 1209.6E+3	T=14 Tage der Slow-Kelvin
Per_FK = 604.8E+3	T=7 Tagen der Fast-Kelvin
Per_KW = 324.0E+3	T=90h der Ultrafast-Kelvin
Per_NK = 94.5E+3	T=26.25h der Normal-Mode-Kelvin
Per_10 = -82.3E+3	T=22.86h der Normalmode
Per_11 = -345.6E+3	T=4 Tage der 5-Tage-Welle
Per_12 = -792.0E+3	T=220h der 10-Tage-Welle
Per_13 = -1296.0E+3	T=15 Tage der 15-Tage-Welle
Per_21 = -345.6E+3	T=4 Tage der 4-Tage-Welle
Per_23 = -1296.0E+3	T=15 Tage der 15-Tage-Welle mit anderer Wellenzahl

#### 4.2.9 &PWF Planetare Wellen - Amplituden

Die Amplituden (A) der planetaren Wellen sind als Temperaturstörung angegeben.

fi0_2d = 2.900E-4	A=2.900E-4 K/s der 2-Tage-Welle
fi0_SK = 0.024E-4	A=0.024E-4 K/s der Slow-Kelvin
fi0_FK = 0.024E-4	A=0.024E-4 K/s der Fast-Kelvin
fi0_KW = 0.024E-4	A=0.024E-4 K/s der Ultrafast-Kelvin
fi0_NK = 0.020E-4	A=0.020E-4 K/s der Normal-Mode-Kelvin
fi0_10 = 0.040E-4	A=0.040E-4 K/s der Normalmode
fi0_11 = 0.000127339	A=0.000127339 K/s der 5-Tage-Welle
fi0_12 = 0.000100145	A=0.000100145 K/s der 10-Tage-Welle

fi0_13 = 4.1607E-5	A=4.1607E-5 K/s der 15-Tage-Welle
fi0_21 = 2.79053E-6	A=2.79053E-6 K/s der 4-Tage-Welle
fi=_23 = 0.000153258	A=0.000153258 K/s der 15-Tage-Welle

#### **4.2.10 &GRW Gravity Waves**

Gruppe mit Parametern für die Schwerewellen.

XL = 300000	horizontale Wellenlänge in Meter
WAMPX = 0.01	Amplitude am Äquator für Anregungen von Schwerewellen (gewichtet mit tanh über die Breiten)
CPHASE = 5. 10. 15. 20. 25. 30.	horizontale Phasengeschwindigkeit in $ms^{-1}$ für 6 verschiedene Spektralbereiche ( $\omega = c \cdot k$ )
TETA = 0. 45. 90. 135. 180. 225. 270. 315.	azimutale Ausbreitungsrichtung, Werte sind in $[\circ]$
GWAM = XXX	Monat der Rechnung in englischer Abkürzung mit 3 Zeichen z.B. MAY, OCT

#### **4.2.11 &SOL Sonne und Chemie**

F107 = 120.	Solarer Strahlungsfluss bei 10.7cm Wellenlänge (2800 MHz) ändert sich im 11-jährigen Zyklus der Sonne, Minimum 2009 = 60, Maximum 2002 = 240, das Solare Mittel wird mit 120 gemessen, Einheit $1sfu = 10^{-22}Wm^{-2}Hz^{-1}$
-------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SOLE = 1.00	<p>Faktor für Erwärmungsraten, variieren nur für Sensitivitätstests, Wert exakt nach Strobel (1981) bei SOLE = 1, Variationsbeispiele: bei 1.05 bzw. 0.95 ändert sich die Erwärmungsraten um +5% bzw. um -5%, Erwärmungsraten nach Strobel (1981):</p> <p>Lyman Alpha: 0.5</p> <p>Chappius: 0.5</p> <p>Huggins: 0.75</p> <p>Herzberg: 0.055</p> <p>Hartley: 0.786</p>
-------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

SOLC = 1365.0	Solarkonstante in $Wm^{-2}$
---------------	-----------------------------

---

## 5 (Unter-)Programme in MUAM

### 5.1 Übersicht

Hinweis: Die „com\_main.fc“ und „com-namelist.fc“ werden in allen (Unter-)Programmen außer in „ircool\_60.f“ sowie „acc\_ASM.f“ und „egwd\_RSHU.f“ eingebunden. In den beiden erstgenannten wird nur die „com\_main.fc“ aufgerufen, das letztere ist eigenständig. Die „com\_main.fc“ ruft wiederum das Programm „param\_grid.f“ auf (siehe Abschnitt 6.7).

Der Aufruf der einzelnen Unterprogramme erfolgt in dieser Reihenfolge und mit folgenden Bedingungen (anklicken der Routinen führt zum jeweiligen Kapitel mit weiteren Erläuterungen):

model\_48.f

```
→ open_60.f
    – O3model_Berlin_60.f
    – species_60.f
      * include 'data_newCO2.f'
→ init_60.f
    – include 'data_TMP_SPW.f'
    – include 'data_GH_SPW.f'
    – include 'data_H2O.f'
→ fourier_matrix.f
→ fourier_filter_lb.f
→ irc_60.f
    – include 'data_newCO2.f'
    – IF(IREP.eq.0) then call CCO2GR.f
      * include 'pco2o3.f'
→ IF(ncom.eq.null) then call geopot_60.f
→ IF(ncom.eq.null) then call vbew.f
→ IF(ncom.eq.null) then
```



```

    call grwaves_RSHU.f

    call acc_ASM.f

    – egwd_RSHU.f

→ IF(ncom.eq.null) und IF(muvir.ge.1) call strobels_60.f

    – include 'data_strobels.f'

→ IF(ncom.eq.null) und IF(muvir.ge.2) call ircool_60.f

    – include 'data_irc_LIM.f'

    – include 'udssr.f'

→ IF(ncom.eq.null) und IF(mforc.eq.2.and.ncom.ge.nphi) call plwaves_LIM.f

→ IF(mod(ncom,2*ntime).eq.null) then call grwaves_RSHU.f

→ IF(ncom.lt.nphi) und IF(muvir.ge.1.and.mod(ncom,2*ntime).eq.0) call strobels_60.f

    – include 'data_strobels.f'

→ IF(ncom.lt.nphi) und IF(muvir.ge.2.and.mod(ncom,2*ntime).eq.0) call ircool_60.f

    – include 'data_irc_LIM.f'

    – include 'udssr.f'

→ IF(ncom.ge.nphi) und IF(muvir.ge.1.and.mod(ncom,2*ntime).eq.0) call strobels_60.f

    – include 'data_strobels.f'

→ IF(ncom.ge.nphi) und IF(muvir.ge.2.and.mod(ncom,4*ntime).eq.0) call ircool_60.f

    – include 'data_irc_LIM.f'

    – include 'udssr.f'

→ IF(mforc.eq.2.and.ncom.ge.nphi) call plwaves_LIM.f

→ tendenz_60_1.f

    – molcon_60_1.f

→ tendenz_60_a.f

    – geopot_60.f

    – vbew.f

    – ncool_PWs_60.f

```

- bi\_diff\_60.f
- **IF**(ncom,ge.nphi) **then call** legandr\_philb.f
- **IF**(ncom,ge.nphi) **then call** molcon\_60\_1.f
- fourier\_filter.f
- **IF**(mod(ncom,nstep).eq.0) und **IF**(mod(ncom,nout).eq.0) **call** geopot\_60.f
- **IF**((ncom-nend).eq.0) und **IF**(mod(ncom,nout).eq.0) **call** geopot\_60.f
- **IF**(mod(ncom,nstep).eq.0) und **IF**(mod(ncom,nout).eq.0) **call** vbew.f
- **IF**((ncom-nend).eq.0) und **IF**(mod(ncom,nout).eq.0) **call** vbew.f
- **IF**(ncase.eq.0) **call** levy.f

## 5.2 model\_48.f

Hauptprogramm von MUAM, startet alle Subroutinen.

- Vorbereitung:
  - open: Öffnen der Ausgabedateien .dx; Öffnen von Eingabedateien (z.B. Konzentrationen der Gase: O3model\_Berlin, species)
  - init: Initialisierung des Modells mit Eingabedaten (z.B. ERA bei 1000hPa, Wasserdampf, globale Konstanten)
  - fourier\_matrix, fourier\_filter\_lb: Parameter für Filter/Glättungen am Unterrand
  - irc: beschreibt Konstanten und ein eigenes Gitter für die Abkühlungsraten ( $H_2O, CO_2, O_3$ ); Aufruf der  $CO_2$ -Daten
- Beginn der Zeitschleife:
  - do 100 ncom=null,nend
- Sonderfall Zeitschritt 0 (**IF** ncom=null)
  - geopot: Geopotential aus hydrostatischer Grundgleichung
  - vbew: Berechnet Vertikalwind aus Kontinuitätsgleichung
  - Paket zur Ausgabe in die binären dx-Dateien
  - grwaves\_RSHU: Schwerewellenparametrisierung nach Lindzen
  - strobil: Erwärmungsraten

- ircool: Abkühlungsraten
- plwaves\_LIM (ab 120): Anregung zusätzlicher PW (aus `muam_mod.txt`)
- Zeitschleife läuft weiter
  - grwaves\_RSHU, acc\_ASM: Schwerewellenparametrisierungen nach Lindzen und Yigit
  - strobrel: Erwärmungsraten
  - ircool: Abkühlungsraten
  - plwaves\_LIM (ab 120): Anregung zusätzlicher PW (aus `muam_mod.txt`)
  - tendenz\_60\_1, tendenz\_60\_a: Tendenzterme  $du/dt$ ,  $dv/dt$ ,  $dT/dt$  (inklusive Aufruf von `geopot`, `vbew`, `ncool_PWs`, `bidiff`, `molcon`, `legendr_philb`)
  - fourier\_filter: Glättung
  - Ausgabe: letzten Zeitschritt in `f2`, alle 1h (4h) in `dx`
  - levy: CFL-Kriterium

### 5.3 open\_60.f

Öffnen und teilweise Einlesen von Dateien, aus denen gelesen werden soll bzw. Öffnen von Dateien, in die geschrieben werden soll.

- Öffnen der Steuerdatei `muam_mod.txt` mit Kennziffer 10
- Lesen aller Namelists aus der Steuerdatei
- Öffnen der `.dx`-Dateien FUVT, FPHI, FVER, FGFU, FGFV, FGAU, FGAV (Kennziffer 72,24-29)
- Öffnen der alten und neuen `f2`-Datei FOLD (Kennziffer 12) und FNEW (Kennziffer 2)
- Einlesen der Werte aus FOLD
- Bildschirmausgabe für `ken`
- Festlegen des Monats `nmon` (1...12) basierend auf NDEK (=Tag des Jahres)
- Einlesen der  $CO_2$ -Daten des jeweiligen Jahres; vom Mauna Loa Observatorium als Ausgangswert für das zugehörige Höhenprofil
- Aufruf von `O3model_Berlin_60.f` für Ozongehalt im jeweiligen Monat und Jahr
- Bildschirmausgabe für Ozongehalt für alle Höhen

- Aufruf von `species_60.f` (sonstige Profile für Gaskomponenten)

## 5.4 O3model\_Berlin\_60.f

Liest ein Ozonprofil für einen speziellen Monat eines Jahres (gegeben durch NDEK und YEAR) aus einer externen Datei und interpoliert das gegebene Gitter auf das MUAM-Gitter.

Daten ganz früher (nach Lange, 2001):

- mit analytischen Funktionen approximiertes Nordwinterprofil (Berger, 1994)

Daten zwischenzeitlich (Fröhlich und Jacobi, 2004):

- zusätzlich neue Ozondatensätze
- der erste (A) verbindet Daten von GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) mit der Berliner Ozonklimatologie (Fortuin und Langematz, 1994). GOME wurde vom DLR zur Verfügung gestellt (nur das Jahr 2001), Angleichung an COMMA-Gitter durch I. Fedulina
- der zweite (B) wurde vom Chemie-Transport Modell SUNY-SPB (State University New York – St. Petersburg) erstellt, welches Ozondaten von SAGE II assimiliert (Smyshlyaev und Geller, 2001); Jahre 1989 und 1986 für solare Maximum- und Minimumbedingungen

Daten bis 2014:

- mittlere Klimatologie aus Berliner Ozondaten (Fortuin und Langematz, 1994)
- Ozonesonde + CIRA/SBUV Daten [ppmv]
- zonal gemittelte Monatsmittel für den Höhenbereich bis 90km (erfasst sekundäres Ozonmaximum)
- Gitter: 37 Breiten (Abstand  $5^\circ$ ), 34 Drucklevel zwischen 1000 und 0.003hPa (gegeben in durch Feld `data_press`), 12 Monate

Daten seit 2014:

- Quelle: SPARC
- Globale Monatsmittel von Ozonprofilen für den Zeitraum 1979-2005
- erzeugt aus einer Kombination von Klimatologien, SAGE I und SAGE II Daten, zusammen mit polaren Ozonsonden aus Resolute und Syowa
- Es ist beabsichtigt einen Großteil der beobachteten niedrigfrequenten Jahr-zu-Jahr-Variation abzudecken
- Das vertikale Integral stimmt mit TOMS/SBUV Daten gut überein

- 37 Breiten (Abstand 5°), 50 Höhenlevel (1km bis 50km), insgesamt 324 Monate Jan 1979 bis Dez 2005

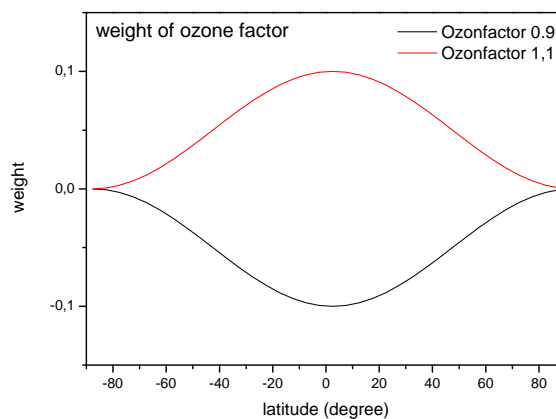
Allgemeines zur Subroutine:

- **blev** sind die Höhenlevel in log-p-Koordinaten ( $z = -7km \cdot \ln p/p_0$ ) bei gegebenen Druckwerten aus **data press**
- **blat** sind die Breiten in Grad (von -90 bis 90°)
- **o3lat(j)** kann zusätzlich durch einen Sinus gewichtet werden, wobei der gewichtete Anteil vom Originalwert abgezogen wird:

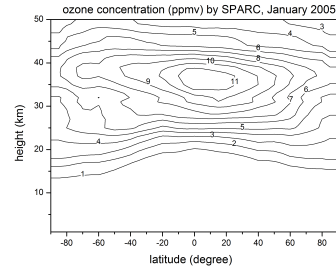
$$O_{3_{weight}} = O_{3_{original}} + ((OZON - 1.0) \cdot \sin((lat - 1) \cdot \frac{\pi}{37 - 1})^2 \cdot O_{3_{original}}$$

(siehe auch Abb. 2 als Beispiel).

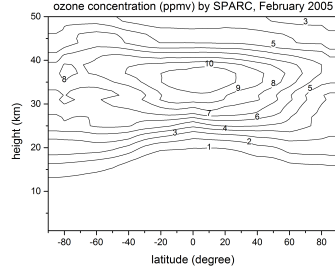
- Subroutine **SPL3**: berechnet Spline zwischen den 2 Gittern (?)
- **comlat** sind die COMMA- (MUAM-) Breiten (36 von -87.5 bis 87.5°)
- Subroutine **SEVAL0**: rechnet Ozonwerte vom Messgitter in COMMA-Gitter um (bei Berlinaten: untere 17 Höhenlevel ohne Einbußen interpoliert, oberhalb exponentieller Abfall mit Skalenhöhe  $H = 7$  km angenommen, wegen Absorption durch molekularen Sauerstoff)
- Function **VM0**: gibt die Konzentration von Ozon aus
- Function **VM0INT**: gibt das Integral über die Konzentration aus



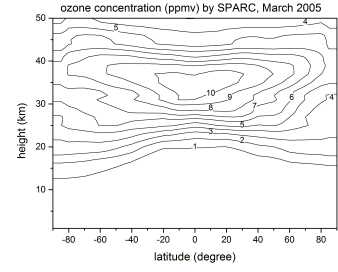
**Abb. 2:** Beispielfunktion der meridionalen Wichtung der Ozonkonzentration: Erhöhen am Äquator um 10% (rot, OZON=1.1), Absenken am Äquator um 10% (schwarz, OZON=0.9). Die Werte an den Polen bleiben konstant.



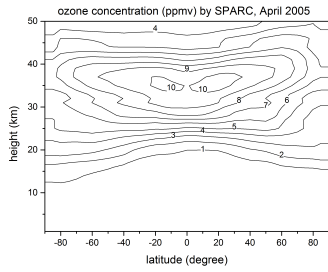
(a) Januar



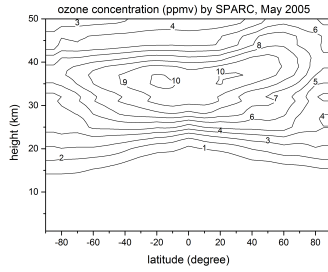
(b) Februar



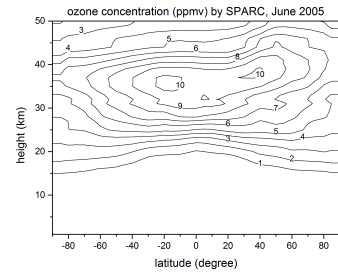
(c) März



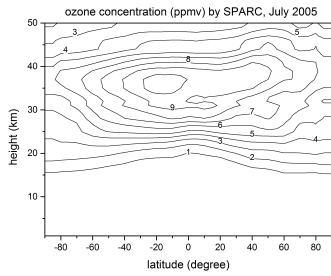
(d) April



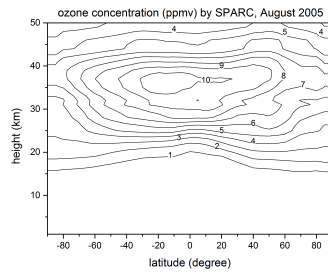
(e) Mai



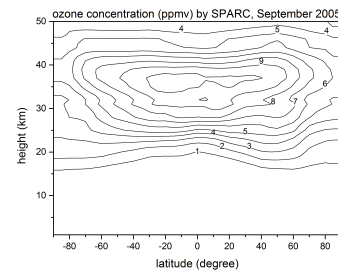
(f) Juni



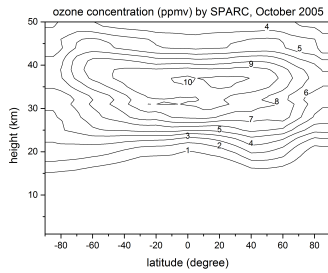
(g) Juli



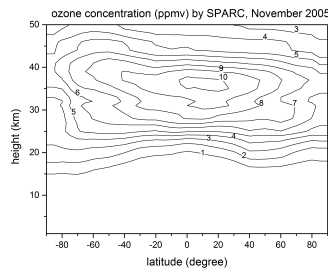
(h) August



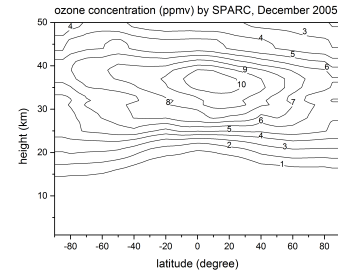
(i) September



(j) Oktober



(k) November



(l) Dezember

**Abb. 3:** Ozonkonzentration (ppmv) von SPARC am Beispiel Januar bis Dezember 2005.

## 5.5 species\_60.f

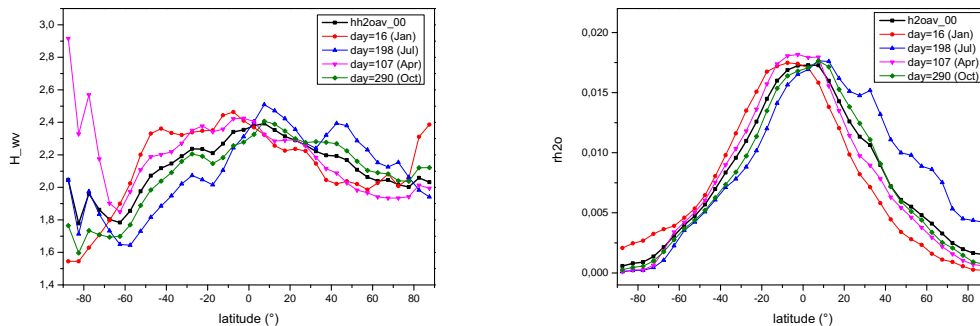
erzeugt  $N_2$ ,  $O_2$  und  $O$  bezogene Profile für MUAM

## 5.6 init\_60.f

Untere Randbedingungen und Gitter:

- Bildschirmausgabe zur Kontrolle der Namelistparameter
- Datenlisten:
  - $a$  – Erdradius in Meter
  - $dkli$  – Druckfaktoren
  - $xncir$  – Koeffizient für  $H_2O$  Säule in ircool\_newCO2.f
  - $\sigma_1$  – Iondrag Koeffizient (60 Level)
  - $\sigma_2$  – Koeffizient für Lorentzablenkung (60 Level)
  - $\alpha_{NC}$  – Profil Newtonscher Kühlung (60 Level)
- Öffnen und Einlesen der Randbedingungen (Reanalysen NCEP/ERA) aus den Dateien TLB, G11, G22, G33, T11, T22, T33, G00, T00
- Festlegen von Parametern (unterer Rand) für UKMO-Daten (veraltet)
- Festlegung der Wasserdampfverteilung am Unterrand (siehe Abb. 4), aufgeteilt in 4 zeitlich harmonische Schwinungen, um das saisonale Verhalten zu beschreiben:
  - $rh_2o$  ist die empirische Verteilung (NCEP/NCAR)  $H_{wv}$  ist das Wasserdampffeld
- Z.259-262:  $T_{1000}(j,i)=\dots \rightarrow$  Rekonstruktion der Bodentemperaturen im MUAM-Gitter aus Zonalmittel und Amplituden+Phasen der stationären planetaren Wellen
- Z.271-274:  $G_{1000}(j,i)=\dots \rightarrow$  Rekonstruktion des Geopotentials am Boden im MUAM-Gitter aus Zonalmittel und Amplituden+Phasen der stationären planetaren Wellen
- Initialisierung verschiedener globaler Konstanten
  - $dx(j)$  – Abstand der Längengrade voneinander, abhängig vom Breitengrad ( $2\pi(r \cos \phi)/64$ )
  - $rou = \exp(-z/h) = p/p_0$  wegen  $z = H \ln p/p_0$
- ab Z.338: Profil für Newtonsche Kühlung nach Zhu (1993), auskommentiertes alternatives Profil von Holton (1976) mit *tanh*-Verteilung, weiteres ähnliches Profil von Schoeberl et al. (1983) (?), konnte aber im Paper noch nicht gefunden werden (im Programm ebenfalls *tanh* verwendet, im Paper aber ähnlich einem T-Profil)
- Z.342-346: Profil für turbulenten (Eddy-) Diffusionskoeffizient (bis 90km auf einen Wert von 100 ansteigend, danach wieder fallend)

- Berechnung von Ionenabbremsung, Rayleighreibung und Lorentzablenkung nach Fröhlich et al. (2003), Abschnitt 1.5.
- Grundeinstellung für Dichteprofile u.Ä., Neuberechnet in `strobel_60.f`
- H<sub>2</sub>O-Verteilung: horizontal bei 1000 hPa gegeben durch NCEP-Daten (siehe oben und Abb. 4), vertikale Verteilung ist analytische Funktion mit abnehmendem Wasserdampf mit der Höhe bis  $k = 9$  ( $\approx 24$  km)



**Abb. 4:** Wasserdampfparameter am unteren Rand (1000 hPa) für je vier ausgewählte Tage des Jahres (Farben) und für ein zeitliches Mittel (schwarz).

## 5.7 `fourier_matrix.f`

Berechnung der Legendrepolynome für `fourier_filter.f`

Im Programm kann eine Welle mit bestimmter zonaler Wellenzahl herausgefiltert werden (Array `wk2(kf)`)

## 5.8 `fourier_filter_lb.f`

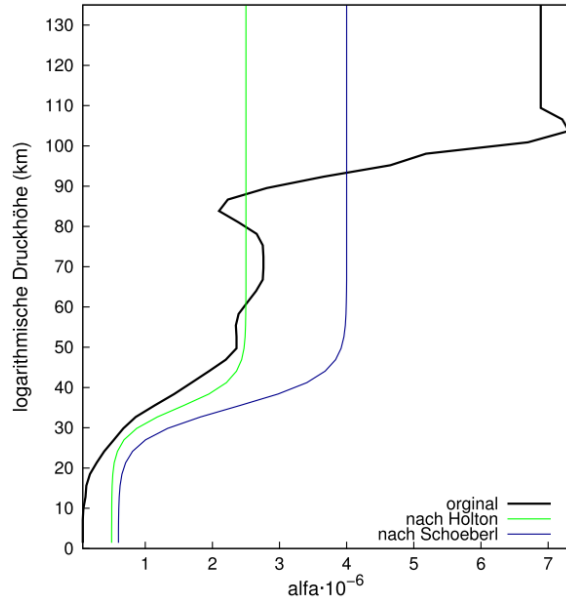
Filterung für untere Randbedingung, genauso wie in `fourier_filter.f`

## 5.9 `irc_60.f`

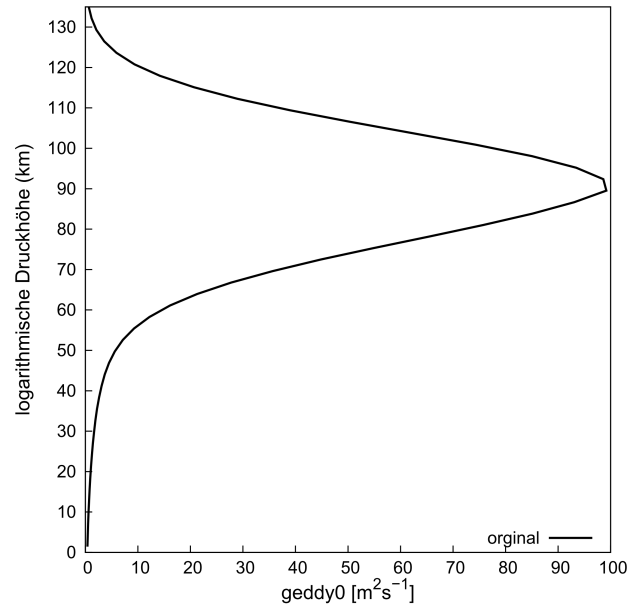
Zusätzliche Matrizen für `ircool_60.f`

Initialisierung der  $CO_2$ -Parametrisierung nach Ogibalov et al. (2000), z.B. Anpassung der festen  $CO_2$ -Konzentration `HC02VMR` an den aktuellen Jahreswert

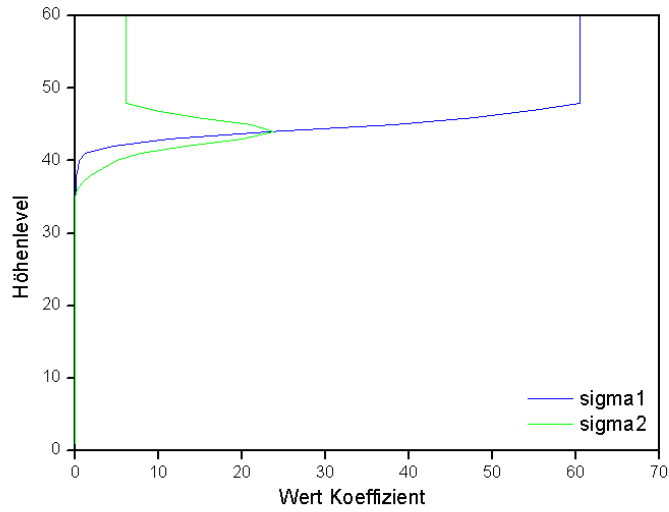




(a) Profile of Newtonian Cooling



(b) analytical profile of the eddy diffusion coefficient



(c) Profile of 60 level coefficient for ion drag (sigma1) and 60 level coefficient for Lorentz deflection (sigma2)

**Abb. 5:** Profile in der `init_60`-Subroutine.

## 5.10 CCO2GR.f

Zitat aus Subroutine:

Berechnet Parametrisierungskoeffizienten für die Abkühlungsrate der  $15\mu\text{m}$   $\text{CO}_2$  Bande für künstliches  $\text{CO}_2$ -Volumenmischungsverhältnis (ohne Höhenvariation bis  $x=12.5$ ) in einer Spanne von 150-720ppm. Koeffizienten werden für die atmosphärischen Schichten  $x = 2$  bis  $x = 16.5$  berechnet. Um internen Wärmeaustausch zu ermöglichen, wird ein irreguläres Gitter innerhalb der LTE-Schicht ( $x = 0 - 12.5$ ) verwendet. Wichtig: Von  $x = 2$  bis  $x = 13.5$  können die Koeffizienten nur im vertikalen Gitter mit Abstand 0.25 berechnet werden. Im Bereich  $x = 14 - 16.5$  kann ein beliebiger vertikaler Abstand gewählt werden, jedoch sind dafür eine Modifizierungen notwendig. Oberhalb  $x = 16.5$  sind keine Koeffizienten zur Berechnung der Abkühlungsraten notwendig.

Input:

C02(17) -  $\text{CO}_2$  vmr im Gitter von  $x = 12.5 - 16.5$  mit Schritt 0.25

AM(17) - Molekulargewicht von Luft (g/Mol) im selben Gitter

UTOP -  $\text{CO}_2$  Säulenmenge ( $\text{cm}^{-2}$ ) oberhalb von  $x = 16.5$

RCO2 -  $\text{CO}_2$  Volumenmischungsverhältnis unterhalb von  $x = 12.5$

Output:

Parametrisierungskoeffizienten für die Matrixparametrisierung (zwischen  $x = 2$  und  $x = 12.5$ ) und die Rekursionsformel.

Sonstiges:

- AMAT,BMAT(43,9) - Koeffizienten der Matrixparametrisierung
- AL(17) - Koeffizienten der Rekursionsformel. Beachte: Bei  $x = 14.00$  beginnend sind die Koeffizienten identisch zu den „escape functions“ (?), welche mit beliebigem Vertikalwind berechnet werden können. Daher kann ab diesem Level ein beliebiger Vertikalwind genutzt werden.
- Subroutine A18LIN ist lineare Interpolation
- Subroutine A18INT ist ein Spline 3. Grades

## 5.11 geopot\_60.f

Geopotential aus hydrostatischer Grundgleichung

## 5.12 vbew.f

Vertikalbewegung aus Kontinuitätsgleichung im p-System:

$$\nabla_p \cdot v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (1)$$

also: (das hier ist eine Vermutung, aber noch lückenhaft!)

$$\partial \omega = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \partial p \quad (2)$$

$$\partial \frac{dp}{dt} = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \partial p \quad (3)$$

$$\partial \frac{dz}{dt} = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \frac{\partial p}{\partial p_0} \partial z \quad (4)$$

$$\partial w = - \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \exp \left( \frac{-z}{H} \right) \partial z \quad (5)$$

Das Minus aus der Gleichung hebt sich bei der Integration (Summation) auf, welche von oben nach unten erfolgt, wodurch die Grenzen umgekehrt werden:

$$w = \int_{z_{oben}}^{z_0} \partial w dz \quad (6)$$

**dvx** – Änderung des Zonalwindes in zonaler Richtung (Differenz u(i+1) und u(i-1))

**dvx** – Änderung des Meridionalwindes in meridionaler Richtung (Differenz v(j+1) und v(j-1), gewichtet mit  $\cos \phi$ )

**div** – Divergenz des Windes  $\nabla \cdot v = (\partial u / \partial x + \partial v / \partial y) \cdot dz \cdot \exp(-z/h)$

**wn1** – Vertikalbewegung (Achtung, p-System!):  $\omega = dp/dt$

## 5.13 grwaves\_RSHU.f

Schwerewellenroutine von der Russian State Hydrometeorological University (RSHU) in St. Petersburg (A. Pogoreltsev).

Kurz und knapp:

- jede vertikale Säule wird einzeln betrachtet
- künstliche Anregung der Wellen bei 10 km Höhe (k=4)
- GW Spektrum reicht von 5 bis 30m/s (6 Geschwindigkeiten) in 8 Azimuthwinkeln (=48 Wellen)

- GW Amplituden steigen exponentiell mit der Höhe (wegen Abnahme der Dichte)
- kritisches Level wird aus Hintergrunddynamik berechnet
- GW brechen, wenn  $c - u = 0$
- darüber können Amplituden wieder ansteigen und später erneut brechen usw.
- aus den Amplituden werden GW Impulsfluss und Beschleunigung berechnet

Allgemeine Informationen:

- detaillierte Beschreibung in Fröhlich et al. (2003), Abschnitt 1.1
- Parametrisierung der Schwerewellenbeschleunigung basiert auf der analytischen Lösung (WKB-Approximation) der Gleichung für die Vertikalstruktur von Schwerewellen in der Atmosphäre mit realistisch künstlichem Hintergrundwind und realistischer Strahlungsdämpfung (Newtonsche Kühlung) (Fröhlich et al., 2003)
- Eddy Diffusionskoeffizient abgeschätzt nach der Idee der Schwerewellenbrechung durch Instabilität (Lindzen, 1981)
- Limits der Maximalamplituden, die von Schwerewellen erreicht werden können nach Hodges (1967), Hodges (1969), Lindzen (1968) und Lindzen (1981)
- grundlegende Literatur zum Einfluss der Schwerewellen auf den Hintergrundwind: Schoeberl et al. (1983), Holton und Zhu (1984), Hunt (1986), Jakobs et al. (1986), Pogoreltsev und Pertsev (1996), Akmaev (2001)
- Wärmeaustausch von GW mit Atmosphäre nach Medvedev und Klaassen (2003), Plumb (1983)
- Effizienz mechanischer Energieumwandlung einbezogen, turbulente Prandtlzahl=3 (Huang und Smith, 1991)
- Wärmeflüsse und Divergenzen werden explizit ausgerechnet, genutzt werden die Polarisationsbeziehung für GW und die analytische Lösung

Hinweise zur Subroutine:

- Z.49: `data nwaves /48/, eff0/1./`: Anzahl der Schwerewellen ( $6 \times 8 = 48$  für 6 Phasengeschwindigkeiten und 8 Azimuthwinkel), Effektivitätsfaktor (war zwischenzeitlich auch = 2.)
- Z.55: `data Rg/287.04/,gam/1.4/,x1/300000./,pr/3./`: individuelle Gaskonstante für trockene Luft / Quotient aus  $c_p$  und  $c_v$  / horizontale Wellenlänge der Schwerewellen (Achtung! Überschreibt Daten aus `muam_mod!`) / turbulente Prandtlzahl

- Z.67: `data omega0/1.e-4/,alpha/0.8333/,gamma/1.5/,c1/10./,c2/4./`: Bezeichnet Konstanten nach Gavrilov und Fukao (1999) für die Spektren interner Schwerewellen (Formeln S.3488, Konstanten S.3490). Anwendung finden diese in Z.89
- Z.101-126: WAMPX bezeichnet die in der `muam_mod.txt` angegebene Amplitude für Schwerewellen → diese wird global über alle Breiten in Form einer Tangenzfunktion gewichtet, abhängig vom jeweiligen Monat (GWAM)
- `wampl0` ist die Amplitude der Störung des Vertikalwindes am unteren Rand. Sie hängt von der Jahreszeit (vom Monat) ab. zu den Äquinoktien sollte das Bild symmetrisch zum Äquator sein, im Winter sind die Amplituden höher als im Sommer (Eckermann in QJRMS).
- Z.137: `Pr_mol=4.*gam/(9.*gam-5.)` ist Näherungsformel für molekulare Prandtlzahl (steht z.B. auch so bei Wikipedia unter Prandtlzahl)
- Z.146: Profil für Newtonsche Kühlung `alfaNC` aus `init.f`
- Z.147: Profil für turbulenten (Eddy-) Diffusionskoeffizient `debg0` aus `init.f`
- Z.169: `rvisk=Pr_mol/C_p*rheat` steht für die dynamische Viskosität `rvisk`, mit molekularer Prandtlzahl `P_mol=4.*gam/(9.*gam-5.)` (Z.139), spezifischer Wärmekapazität `C_p` und Wärmeleitfähigkeit `rheat`
- Z.190: `debgm` ist Profil des molekularen Diffusionskoeffizienten, der sich aus der dynamischen Viskosität `rvisk`, normiert durch die Dichte, ergibt
- Z.195-206: Hintergrundprofile für Wind und Temperatur, der Zusatz `z` bezeichnet die erste Ableitung nach der Höhe, der Zusatz `zz` die zweite
- Z.207: `omb2(k)` ist die Brunt-Väisälä-Frequenz  $N^2$ , als Funktion der Temperatur statt der potentiellen Temperatur wie sonst üblich
- Z.231-249: Beginnend bei `k=4` (10km Höhe) wird über alle Höhen das kritischen Level ermittelt. Dabei werden 3 Bedingungen geprüft:  
`if (omb2(k).le.0.)` prüft die Stabilität der Schichtung. Wenn  $N^2 < 0$  ist die Schichtung instabil und es kommt zum Brechen der Wellen  
`if(abs(cphint(k)).le.1.)` prüft die Differenz der Phasengeschwindigkeit der Welle und des Hintergrundwindes (die intrinsische Phasengeschwindigkeit). Sind diese annähernd gleich, so findet Brechung statt.  
`if (sq.le.dcrit)` mit  $sq = c_{int}^2$  und  $dcrit = \frac{\alpha N h}{k_x}$ . Der Störungsansatz ist nur dann anwendbar, wenn Dämpfung durch Strahlung (radiative damping) schwach ist. Andernfalls wird davon ausgegangen, dass das kritische Level erreicht ist.

- Z.250: Lösung für  $\mathcal{L}$  (`realL1`), siehe Fröhlich et al. (2003) unter Glg. (5)
- Z.253: Lösung für  $\mathcal{M}$  (`realM`), siehe Fröhlich et al. (2003) unter Glg. (5)
- Z.258: `rkz2` ist die vertikale Wellenzahl quadriert, siehe Fröhlich et al. (2003) unter Glg. (6), allerdings fehlt der Term  $-\frac{1}{2} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial z}$
- Z.269/270: (`realL`) entspricht Glg. (17) (Fröhlich et al., 2003) mit `geddef` =  $D(1 + 1/Pr)$  (Z.268), `ompls` =  $\omega^+$ , `alphaNC` =  $\alpha$  (Newtonscher Koeffizient) und `rkz` =  $k_z$  (Z.265)
- Z.272: `wamp1` ist die WKB-Lösung, siehe Fröhlich et al. (2003) Glg. (6)
- bei Variablen steht der Zusatz `km1` für  $(k - 1)$  und bezieht sich auf die entsprechende Variable ein Level unter dem aktuellen
- Z.305: `degw(k)` ist Eddy Diffusionskoeffizient durch das Brechnen der Schwerewellen nach Fröhlich et al. (2003) Glg. (27)
- `wbreak` ist die Maximalamplitude, ab welcher die Wellen brechen und berechnet sich wie folgt: `wbreak` =  $|\omega^+| / k_z$  (Z.275)
- ab Z.426: Mitteln aller Parameter über 5 Höhenlevels, speichern in globale Variablen

## 5.14 `acc_ASM.f`

Führt die beiden Schwerewellenparametrisierungen zusammen: `fgru`, `fgrv` und `fgrt` werden jeweils aus Lindzen und Yigit addiert. Schwerewellenimpulsflüsse werden nicht zusammengeführt, weil diese für keine weitere Rechnung gebraucht werden.

## 5.15 `egwd_RSHU.f`

Schwerewellenparametrisierung nach Yigit et al. (2008) bzw. Yigit et al. (2009), allerdings mit leichten Änderungen im Vergleich zum Original.

Übersicht kurz und knapp:

- jede vertikale Säule wird einzeln betrachtet
- Vorgabe des zonal gemittelten Impulsflusses der GW bei 10 km Höhe ( $k=4$ )
- GW Spektrum betrachtet 30 Wellen mit Phasengeschwindigkeiten  $\pm 35$  bis  $\pm 105$  m/s
- Der GW Impulsfluss wird für jede Höhe unter Berücksichtigung der Dämpfungsterme berechnet

- GW Beschleunigung wird aus den Flüssen berechnet
- Kopplung mit Lindzen: das in Lindzen berechnete Profil des Diffusionskoeffizienten wird in Yigit übernommen (Original: analytisches Profil)

Unterschiede zwischen Original (Yigit) und der MUAM-Version (nach A. Pogoreltsev):

- Originalversion: Mesopause viel zu kalt ( $\approx 100$  K), Jets zu stark (MLT:  $\approx 80$ - $90 \text{ ms}^{-1}$ ), GW-Fluss sehr stark bei ca. 100 km
- deshalb: 1. Lauf nach ursprünglicher Parametrisierung (Weiterentwicklung von Lindzen, 1981), 2. Lauf nach Yigit et al. (2008)
- aber: Modifizierung der Yigit-Parametrisierung
  - Input des Diffusionskoeffizienten aus Lauf 1 (Lindzen)
  - Modifiziertes GW-Spektrum.  
 Original: Gaußverteilung, äquidistant in  $k_z$ , sodass viele schnelle Wellen und wenig langsame, Breite auf halber Höhe (?) =  $\pm 35 \text{ ms}^{-1}$  (sehr schmal)  
 Neu: Gaußverteilung, äquidistant in  $\lambda$ , sodass gleichverteilte Geschwindigkeiten, Breite auf halber Höhe (?) =  $\pm 75 \text{ ms}^{-1}$  (breiteres Spektrum)
- Ergebnis: Mesopausentemperatur auf  $\approx 130$  K angehoben, Jets deutlich kleiner, aber Höhe der Windumkehr stimmt noch nicht (ebenfalls sind Gezeiten nicht optimal)

Hinweise zur Subroutine:

- Variablen Eingang: `ii` (Länge) `m` `jj` (Breite), `rho` (Dichte), `vx1d`, `vy1d`, `temp1d` (u,v,T), `cp1d` ( $C_p$ ), `h` (geopotentielle Höhe)
- Variablen Ausgang: `ut_gwd` (zonale GW Beschleunigung), `vt_gwd` (meridionale GW Beschleunigung), `gwh_ir` (GW Erwärmung durch IR), `gwh_dif` (GW Erwärmung durch Diffusion), `var_tot` (aufsummierte quadratische Wellenamplitude), `flux_tot` (GW Impulsfluss)
- einige Parameter: `ht_dim` = `kgit` = 56 (Levels), `RGAS` = 287. (Gaskonstante), `GRAV` = 9.81 (Schwerebeschleunigung), `PPI` = 3.1415926 ( $\pi$ ), `SLEV` = 4 (Quelllevel der GW), `nh` = 30 (Anzahl Wellen), `flux00` = 0.000005 (GW Fluss bei  $k = SLEV$ , globales Mittel), `cw` = 75. (charakterisiert die Halb-Breite der Gauß'schen Impulsflussverteilung, siehe Yigit et al. (2008), Gl.17), `max_cp_y` = 120. (derzeit ungenutzt), `kx` =  $2 * PPI / 300.e3$  (horizontale Wellenzahl mit Wellenlänge  $\lambda = 300$  km), `max_ht` = 500.e3 (keine Berechnung oberhalb dieser Höhe (ziemlich überflüssig), `dmax` = 300. (für Berechnung des Eddy-Diffusionskoeffizienten, derzeit ungenutzt), `d0` = 100. (für Berechnung des Eddy-Diffusionskoeffizienten, derzeit ungenutzt), `S2` =  $\sqrt{2}$ , `S2P` =  $\sqrt{2\pi}$

- Parameter für die spektrale Wichtung nach Gavrilov und Fukao (1999) identisch zu `grwaves_RSHU.f` gewählt:  $\omega_0 = 1.e - 4$ ,  $\alpha_1 = 5./6.$ ,  $\beta = 1.$ ,  $\gamma = 1.5$ ,  $c_1 = 10.$ ,  $c_2 = 4$ . (Formeln S. 3488, Konstanten S. 3490)
- `flux0` ist `flux00` meridional gewichtet (über  $\tanh$ )
- $xv = u/\sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $yv = v/\sqrt{u^2 + v^2}$ ,  $u\_source = \pm\sqrt{u^2 + v^2}$
- `theta` ist potentielle Temperatur
- `scht1d` ist Skalenhöhe  $H$
- Hintergrundprofile: `v_eddy` würde im Original berechnet werden, wird aktuelle jedoch `=geddy` gesetzt (hier Kopplung zu Lindzen), `m_vis` ist molekulare Viskosität, `alpha` wäre der Koeffizient für Newtonsche Kühlung ( $= 0$ . gesetzt), `vin` wäre die Kollisionsfrequenz zwischen Ionen und neutralen Teilchen ( $= 0$  gesetzt), `eden_m` wäre die Elektronendichte ( $= 0$  gesetzt), `brunt` ist Brunt-Väisälä-Frequenz, `thetap` ist der Gradient der potentiellen Temperatur
- Spektrum: `phasespeed` ist die Phasengeschwindigkeit der einzelnen Wellen ( $\pm 35$  bis  $\pm 105$  m/s), der Impulsfluss der einzelnen Wellen `uw_mom` ist dann entsprechend der Phasengeschwindigkeiten gewichtet (spektrale Wichtung nach Gavrilov und Fukao (1999) ist komplett unwirksam geworden!!!)
- `c_int` ist die intrinsische Phasengeschwindigkeit  $c_{ph} - u$
- `upSq` ist quadratische Wellenamplitude jeder Welle  $|u'|^2$  nach Gl. (3), Yigit et al. (2008), `var_tot` ist Gesamte quadratische Wellenamplitude alle Wellen
- Berechnung des kritischen Levels `c_lev` (lineare Sättigung, keine Welleninteraktion): wenn sich das Vorzeichen der intrinsischen Phasengeschwindigkeit ändert, sie aber nicht  $= 0$  ist, dann Berechnung der Flüsse mit Dämpfungstermen  
 $\text{fac1} = \beta_{mol}^i$  nach Gl. (14), Yigit et al. (2008)  
 $\text{fac2} = \beta_{ion}^i$  nach Gl. (16), Yigit et al. (2008)  
 $\text{EPS} = \epsilon = ???$
- nichtlineare Sättigung (mit Wechselwirkung zwischen Wellen): Wellen mit kurzen Wellenlängen (A) können auf Wellen längerer Wellenlängen (B) aufprallen, Instabilitäten verursachen und eine „welleninduzierte“ Diffusion der Welle A hervorrufen  
 $\text{sigmaSq} = \sigma_i^2$  Windvarianz, die durch Welle A verursacht wird und sich auf Welle i auswirkt (Beschreibung zwischen Gl. (9) und (10) in Yigit et al. (2008))  
 $\text{alpha\_ins} = \alpha_i$  nach Gleichung (10), Yigit et al. (2008)  
 $\text{beta\_non} = \beta_{non}$  nach Gleichung (9), Yigit et al. (2008)



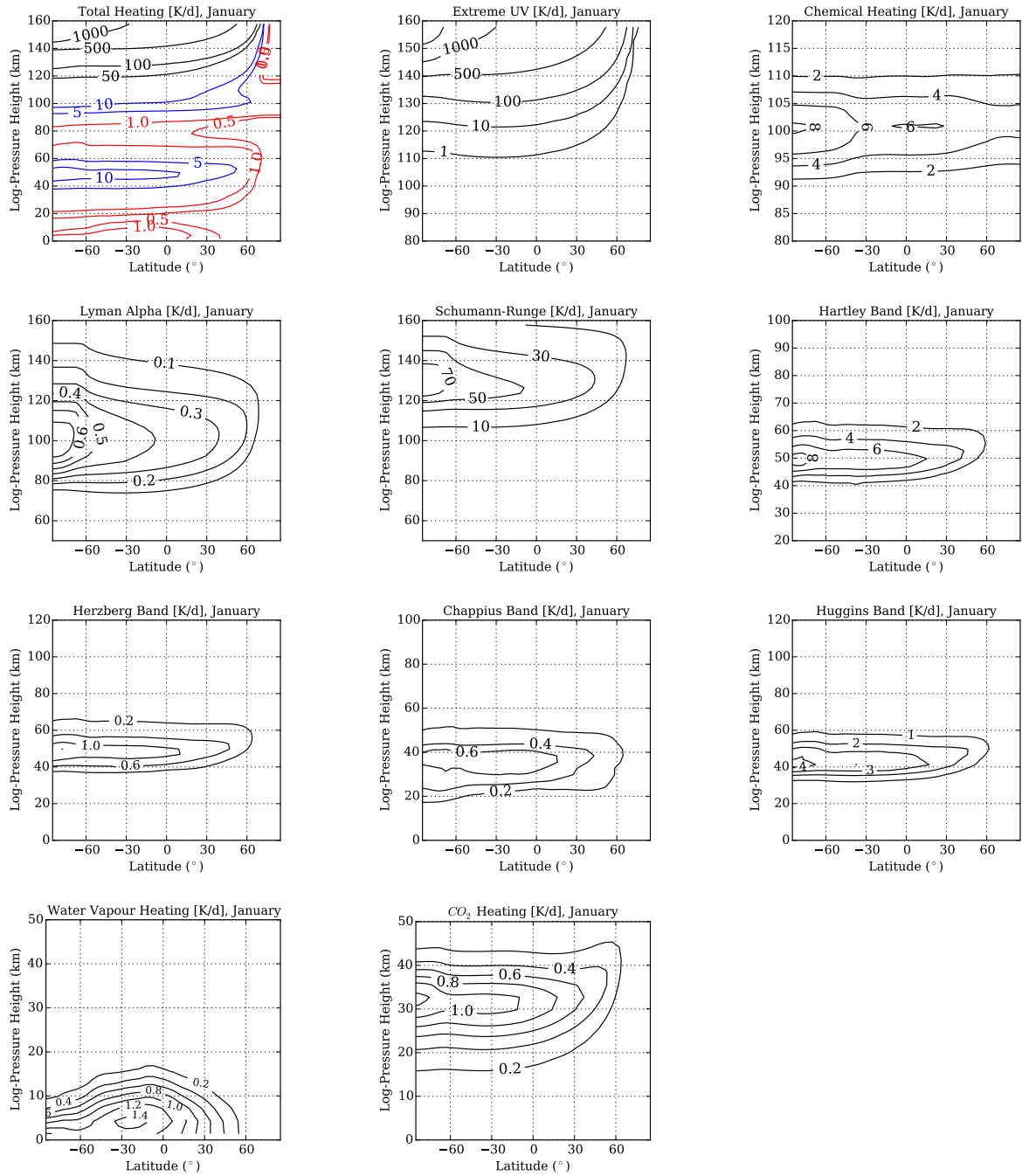
- **beta** =  $\beta_{mol} + \beta_{ion} + \beta_{non}$
- **tau** =  $\tau_i$  Transmissivität nach Gleichung (2), Yigit et al. (2008)
- **flux** ist der Impulsfluss  $\overline{u'w'}$  einer jeden Welle nach Gleichung (1), Yigit et al. (2008)
- **drag** =  $a(z)$  ist die gesamte Beschleunigung des Hintergrundwindes durch das Spektrum gegebener GW, nach Gleichung (5), Yigit et al. (2008)
- zuletzt werden noch die Beschleunigungen und Erwärmungen nach zonal/meridional aufgeteilt und über mehrere Höhen gemittelt

## 5.16 strobel\_60.f

Strahlungsantrieb und Erwärmungsraten:

- numerische Dichteprofile von  $O_3, O_2, O, N_2$  (Z.110-117)
- Berechnung eines höhenabhängigen  $c_p$  (Z.124)
- Deklination (Wanderung der Sonne), Zenitwinkel u.Ä. ab Z.145
- Test, ob Sonne noch hinter Horizont (hell/dunkel) ab Z.173
- dunkel: Erwärmungsraten = 0 (Z.228-231)
- hell: Berechnung der Erwärmungsraten nach Liou (1992); Spektralbereiche nach Fröhlich (2005).
  - $H_2O$ -Erwärmung, eingebaut Oktober 2002 von A. Pogoreltsev: Rayleigh Streuung und Oberflächenreflexion mit einbezogen
  - neue Parametrisierung der  $H_2O$ -Erwärmung von A. Pogoreltsev (Oktober, 2003) nach Freidenreich und Ramaswamy (1999).
  - COMMA-LIM Version der  $CO_2$  Erwärmung, Stand Oktober 2002, A. Pogoreltsev
  - Chappius (450-700nm): Ozonabsorption, Werte nach Strobel (1978).
  - Lyman Alpha (121nm): Absorption von  $O_2$
  - Huggins (300-350nm): Ozonabsorption, Werte nach ?
  - Herzberg (205-242nm): Ozonabsorption
  - Hartley (200-300nm): Ozonabsorption, Werte nach Mlynczak und Solomon (1993).
  - Schumann-Runge: 2 Abschnitte 125-152nm und 152-175nm (laut Programm) nach Mlynczak und Solomon (1993).

- EUV Absorption (5-105nm): Werte nach Richards et al. (1994a), Richards et al. (1994b) und Roble (1995). Erwärmungsrate ist fest in dieser Version (0.366), Flüsse ( $erg/cm^2/s$ ) und Absorptionskoeffizienten ( $cm^2$ ) in 37 Intervallen (von Richards et al. (1994a) und Richards et al. (1994b)), nur hier Einfluss von F107
- chemische Erwärmung



**Abb. 6:** Erwärmungsraten verschiedener Gase in verschiedenen Banden. Darstellung nach Berechnung in der Strobel-Routine (Januarbedingungen). Man beachte die verschiedenen Skalierungen der Vertikalachse.

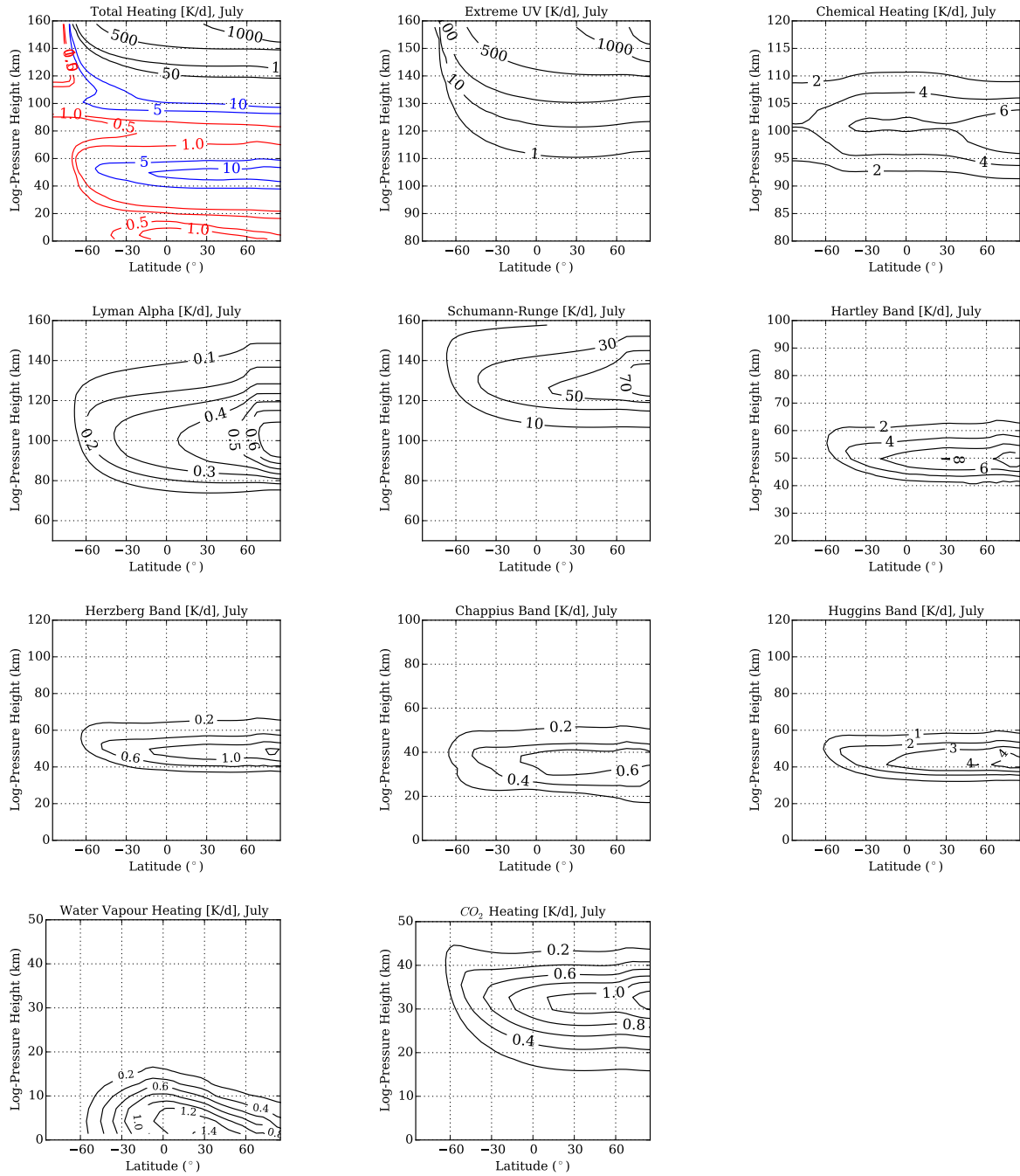


Abb. 7: Wie Abb. 6, nur für Juli.

## 5.17 ircool\_60.f

Die IR-Abkühlung kompensiert neben den latenten und advektiven Wärmeflüssen die solare Aufheizung und balanciert somit das Strahlungsgleichgewicht in der Atmosphäre. In der Tro-

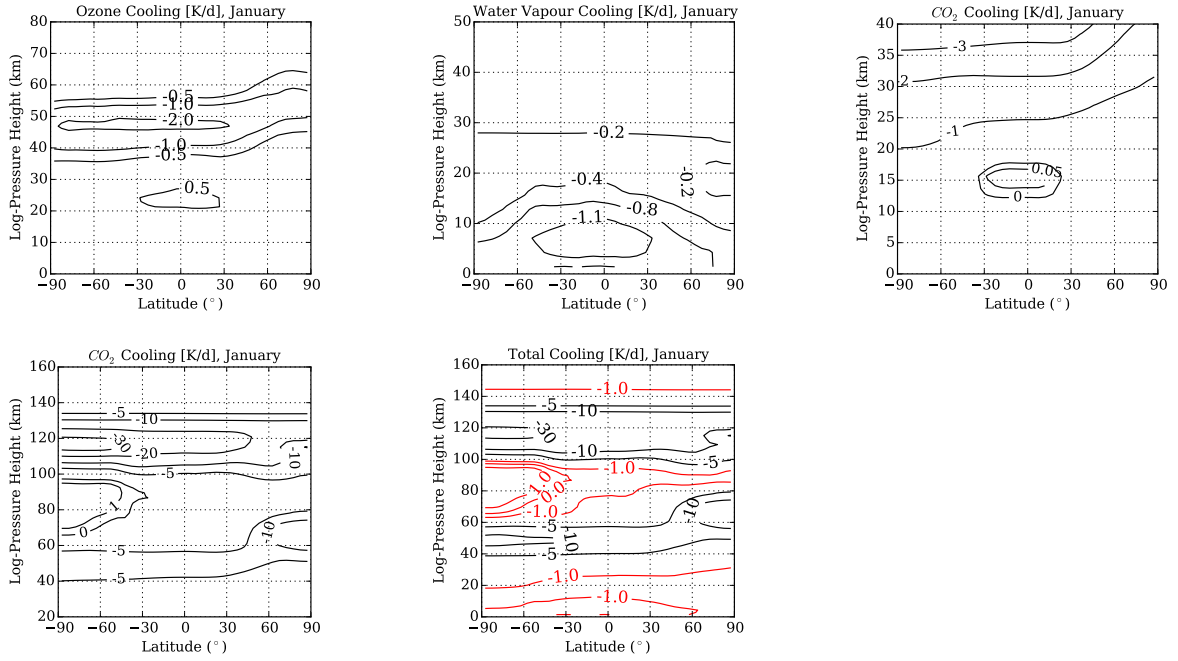
osphäre ist Wasserdampf als Hauptemittent der IR-Strahlung für die Abkühlung der Atmosphäre verantwortlich, in der mittleren dominiert  $CO_2$ .  $O_3$  emittiert in der Stratosphäre und unteren Mesosphäre und  $NO$  trägt in der unteren Thermosphäre wesentlich zur atmosphärischen Abkühlung bei. (Absatz wörtlich aus Dissertation Lange (2001))

Details zu den Parametrisierung für  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $O_3$  und  $NO$  sind in Lange (2001), Kapitel 2.1.2, zu finden.

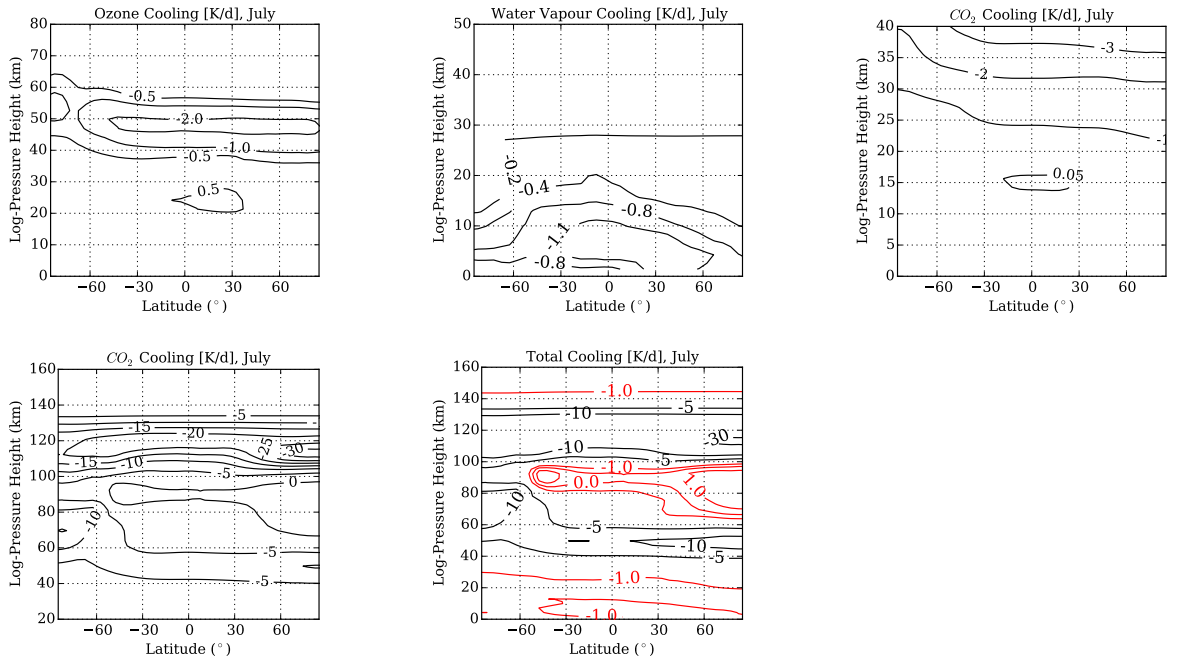
Datenarrays sind in `data_irc LIM.f`, `udssr.f`, `data_newCO2.f` und `pco2o3.f` enthalten.

Aufbau der Subroutine:

- Festlegung von Daten
- Interpolation von MUAM-Temperaturen auf das Gitter der Strahlungslevel (118)
- Ozonparametrisierung nach Fomichev und Shved (1985), Gleichungen 20 und 17
  - Abkühlungsrate durch Ozon ist `epso3(i) =  $\epsilon_{O_3}$`
  - verwendete Ozonkonzentration `co3` kommt direkt aus `O3model_Berlin.f`
- $CO_2$ -Parametrisierung
  - in Bereiche untergliedert: LTE ( $x = 2 - -10.5$ ), Übergangsbereich ( $x = 10.75 - -12.5$ ), NLTE ( $x = 12.75 - -16.5$ ),  $x > 16.5$
  - $CO_2$  Abkühlungsrate ist insgesamt `COOLCO2(i)`
- Wasserdampfparametrisierung
  - untergliedert in: Kühlung durch Erde, Unterseite, Oberseite und Beitrag durch nächste Level
  - Erwärmungsraten sind `epsh1` ( $H_2O$  low), `epsh2` ( $H_2O$  up), `epsh3` ( $CO_2$  low), `epsh4` ( $CO_2$  up)
- Aufaddieren aller einzelnen Erwärmungsraten in den jeweiligen Höhen (`cool(k)`)
- Rückinterpolation auf MUAM-Gitter (`cool1(k)`)
- `fc` ist gesamte Abkühlungsrate mit langsamem Hochfahren



**Abb. 8:** Abkühlungsraten verschiedener Gase in verschiedenen Banden. Darstellung nach Berechnung in der Ircool-Routine (Januarbedingungen). Man beachte die verschiedenen Skalierungen der Vertikalachse.



**Abb. 9:** Wie Abb. 8, nur für Juli.

## 5.18 plwaves\_LIM.f

Routine zur Berechnung planetarer Wellen (PW), entwickelt am LIM durch P. Hoffmann (?), kleinere Korrekturen durch F. Lilienthal (2014).

- Datenlisten für breitengradabhängige Hough-Funktionen  $H$  aller möglichen einbeziehbaren PW (als Temperaturstörung): Graphische Darstellung siehe Abbildung 10
- Hough-Funktionen der Kelvin- und Rossbywellen nach Swarztrauber und Kasahara (1985)
- Schaltereinstellungen aller PW werden, falls  $> 1$ , auf  $= 1$  gestellt (sinnvoll, um den Schalter später als Faktor zu verwenden)
- Festlegung von Parametern für zeitlich verzögertes Einsetzen und langsames Anlaufen der PW (tPWs)
- Bildschirmausgabe zur Kontrolle, welche Wellen mit welcher Amplitude angeschalten sind
- Berechnung der Phase aller Wellen ( $= \omega \cdot t$ )
- Berechnung des Kosinus' aller Wellen  $\cos(kx + \omega t)$
- Faktor `vertst` zur maximalen Anregung in einer Höhe von 10 km (ab 20 km  $\approx 0$ )
- Berechnung des Gesamtanteils planetarer Wellen: Faktoren für zeitliche und höhenabhängige Anregung, Amplituden und Kosinusanteile, Houghfunktionen

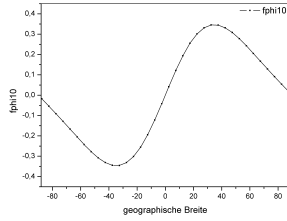
## 5.19 tendenz\_60\_1.f

- Diffusion
- Aufruf von `molcon_60_1.f` für alle Längen und Breiten  $\rightarrow$  molekulare Diffusion
- Durchführen des Zeitschrittes in  $u, v, t$  (prognostische Gleichungen, Integrationsschritt 1)

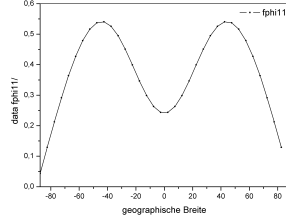
## 5.20 tendenz\_60\_a.f

Berechnung einzelner Tendenzterme und der Bewegungsgleichungen für  $u, v, t$ . Die Bewegungsgleichungen stehen unter der Überschrift TENDENZTERME, ungefähr in der Mitte des Programms (Z.195-210), gekennzeichnet nach ihrer jeweiligen Bedeutung. Die Terme werden im Folgenden (für  $u$  und falls abweichend für  $t$ ) diskutiert und mit den Bewegungsgleichungen aus Fröhlich (2005), S. 35, Glg. 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, verglichen:

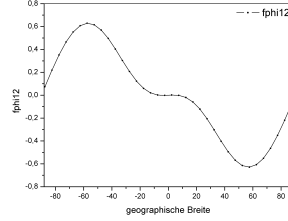
- Advektion zonalen Impulses ( $u, v, t$  analog):  
 $au(k) = aux(k) + auy(k) + auz(k) / rou(k)$  (Z.177) entspricht vereinfacht gesagt den Termen



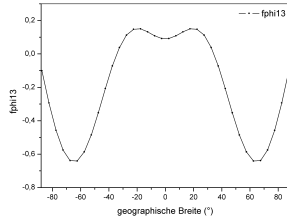
**(a)** Normalmode (10)  
 $T=24h$ ,  $k=1$



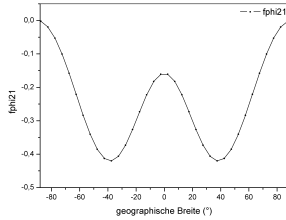
**(b)** 4-Tage-Welle (11)  
 $T=4d$ ,  $k=1$ ,  $\Theta(1, -2)$



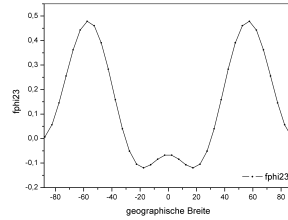
**(c)** 10-Tage-Welle (12)  
 $T=220h$ ,  $k=1$ ,  $\Theta(1, -3)$



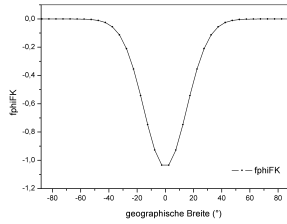
**(d)** 15-Tage-Welle (13)  
 $T=15d$ ,  $k=1$ ,  $\Theta(1, -4)$



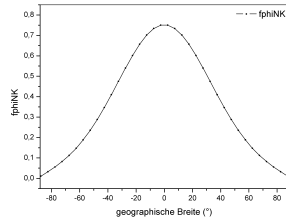
**(e)** 4-Tage-Welle (21)  
 $T=4d$ ,  $k=2$



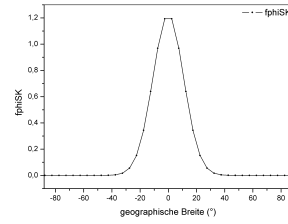
**(f)** 15-Tage-Welle (23)  
 $T=15d$ ,  $k=2$



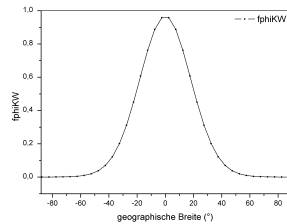
**(g)** Fast Kelvin (FK)  
 $T=7d$ ,  $k=1$



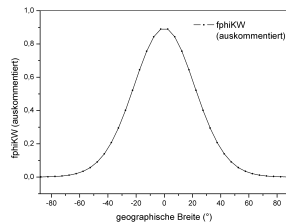
**(h)** Normalmode Kelvin (NK)  
 $T=26h$ ,  $k=1$



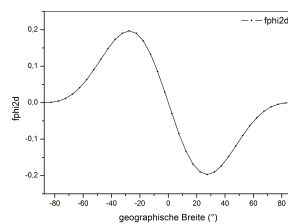
**(i)** Slow Kelvin (SK)  
 $T=14d$ ,  $k=1$ ,  $\Theta(2, 2)$



**(j)** Ultrafast Kelvin (KW)  
 $T=90h$ ,  $k=1$ ,  $\Theta(2, 2)$



**(k)** Fast Kelvin (FK),  
auskommentiert,  $\Theta(2, 2)$



**(l)** Quasi-2-Tage-Welle  
 $T=52.5h$ ,  $k=3$ ,  $\Theta(2, 3)$

**Abb. 10:** Houghmoden ( $\Theta$ ) der anzuregenden planetaren Wellen mit Standardeinstellung von Periodendauer ( $T$ ) und Wellenzahl ( $k$ ).



$\partial u^2/\partial x + \partial(uv)/\partial y + \partial(\rho_0 uw)/\partial z$ . `aux (avx,atx)` werden vorher im Programm berechnet (Z.95-105), danach `auy (avy,aty)` in Z.107-116 und anschließend `auz (avz,atz)` in Z.119-144.

- Corioliskraft (nur in u und v):  
`fu1(k)=vn1_00*(cor(jplus1)-drag(j,k,3)+un1_00*tgfia(jplus1))` (Z.189) entspricht dem Term  $(f+u/a \tan \phi)v$  mit der Modifikation für  $f$  durch die Lorentzkraft  $L (= \text{drag}(j,k,3))$ :  $f$  wird zu  $f - L$  (das ist rein physikalisch natürlich Unsinn, aber in der numerischen Anwendung in Ordnung).
- Druckgradientkraft (nur in u und v):  
`fu2(k)=- (fin1(j,k,i2)-fin1(j,k,i0))*0.5/dx(jplus1)` (Z.74) entspricht dem Term  $-\partial\Phi/\partial x$
- bi-harmonische Diffusion (analog in u,v,t):  
 Die Diffusion `fut(k,i,j)` steckt in  $F_\lambda$ . Die Berechnung findet nicht im gleichen Programm statt, sondern in `bi_diff_60.f` (bitte dort für nähere Informationen nachschauen).
- Schwerewellenbeitrag (u,v,t):  
`fgru(k,i,j)` steckt in  $F_\lambda$  als dissipativer oder beschleunigender Term. Berechnung der Abbremsung/Beschleunigung durch Schwerewellen findet nicht im gleichen Programm statt, sondern in `grwaves_RSHU.f` und `egwd_RSHU.f` (bitte dort für nähere Informationen nachschauen).
- Adiabatische Erwärmung/ Abkühlung (nur in t):  
`ft1(k)=-.28577*(wn1pl/row(kp1)+wn1mn/row(k))/2.*tn1_00/xm(k)/h` (Z.152) entspricht dem Term  $-(RwT)/(m'c_pH)$ , wobei  $R/c_p = 0.28577$  gilt. Nach Andrews et al. (1987) S.115 kommt bei diabatischer Erwärmung  $J/c_p$  hinzu, jedoch ist bei adiabatischer Erwärmung die diabatische Erwärmungsrate pro Einheitsmasse  $J = 0$ , d.h. der Term entfällt.
- Newtonsche Kühlung (nur in t):  
`fnt(k,i,j)` steckt in  $F_T$ . Die Berechnung des Terms findet nicht im gleichen Programm statt, sondern in `ncool_PWs_60.f` (bitte dort für nähere Informationen nachschauen).
- Absorption solarer Strahlung (nur t):  
`hs(k,i,j)` steht für den Term  $\partial T/\partial t|_{sol}$ . Berechnung des Terms findet nicht im gleichen Programm statt, sondern in `strobel_60.f` (bitte dort für nähere Informationen nachschauen).
- IR Kühlung (nur t):  
`fc(k,i,j)` steht für den Term  $\partial T/\partial t|_{ir}$ . Berechnung des Terms findet nicht im gleichen Programm statt, sondern in `ircool_60.f` (bitte dort für nähere Informationen nachschau-

en).

Weitere Bestandteile der Routine:

- Einbinden weiterer Subroutines (siehe Übersicht) zur Berechnung von Geopotential, Vertikalgeschwindigkeiten, etc.
- irgendwas mit lower boundary?
- ähnlich `tendenz_60_1`: Zeitschritt weiter rechnen

### 5.21 `molcon_60_1.f`

molekulare und Eddy Diffusionsterme

### 5.22 `ncool_PWs_60.f`

Newtonsche Kühlung

Für den Koeffizienten der Newtonsche Kühlung `alphaNC` =  $\alpha$  wird Parametrisierung der Strahlungsdämpfungsrate nach Zhu (1993) genutzt.

### 5.23 `bi_diff_60.f`

bi-harmonische Diffusion (Dämpfungsterme)

### 5.24 `legandr_philb.f`

### 5.25 `fourier_filter.f`

Harmonische Filtrierung relativ zu den Polen (36 Breiten):

- 1 und 36 – 2 Harmonische
- 2 und 35 – 3 Harmonische
- 3 und 34 – 5 Harmonische
- 4 und 33 – 7 Harmonische
- 5 und 32 – 9 Harmonische
- 6 und 31 – 11 Harmonische
- 7 bis 30 – 12 Harmonische

## **5.26 levy.f**

Routine für Courant-Friedrich-Levy (CFL) Kriterium zur Stabilitätsanalyse.

- Ausführung der Routine nur alle paar Zeitschritte (falls IF nicht auskommentiert)
- Berechnung CFL Kriterium
- Bildschirmausgabe zur Kontrolle

## **5.27 externe Subroutines**

### **5.27.1 SVD**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`
- Aufgabe: single value decomposition (Berechnung von Singulärwerten) für Rang-2- oder Rang-3-Matrizen
- Quelle: IMSL (Sammlung mathematischer und statistischer Funktionen zur Datenbearbeitung und Datenanalyse)

### **5.27.2 INVSVD**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`

### **5.27.3 POLLEG**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`

### **5.27.4 FILTER**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`

### **5.27.5 PRMV**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`

### **5.27.6 PRVV**

- zu finden in: `fourier_matrix.f`

### **5.27.7 A18INT**

- zu finden in: `CCO2GR.f`

### **5.27.8 SPLINE**

- zu finden in: `irc_60.f`

### **5.27.9 ADAPT**

- zu finden in: `O3model_Berlin_60.f`

### **5.27.10 SEVAL0**

- zu finden in: `O3model_Berlin_60.f`

## 6 Datafiles

### 6.1 data\_GH\_SPW.f

aufgerufen in: `init_60.f` (aber in Folge auskommentiert)

Zonale Mittel und stationäre PW in geopotentieller Höhe bei 1000hPa Drucklevel aus UKMO-Daten

### 6.2 data\_H2O.f

aufgerufen in: `init_60.f`

Zonal gemittelter Wasserdampf bei 1000 hPa Drucklevel und Skalenhöhe (km) aus NCEP-NCAR Daten (1992-2002)

- `h2oav_00` = Zonalmittel
- `h2oav_s1` und `h2oav_c1` = Sinus- und Kosinusanteile der Welle 1 (bzw. 2,3,4 je nach Endung)
- gleiches gilt für `hh2oav_00`, `hh2oav_s1`, `hh2oav_c1` - wird aber scheinbar nicht mehr verwendet
- Zusammensetzung der Wellenanteile erfolgt in `init_60.f` (in der Variable `rh2o(j)`)

### 6.3 data\_irc\_LIM.f

aufgerufen in: `ircool_60.f`

Variablen:

- `T118(118)` = Temperatur von MUAM in vertikalen Strahlungskordinaten von  $CO_2$ /COXO/NO
- `TH2O(72)` = Temperatur von MUAM in vertikalen Strahlungskordinaten von  $H_2O$
- `T(72)` = Temperatur von MUAM in vertikalen Strahlungskordinaten von COX
- `cpara(12)` = Koeffizient  $C_j$  aus Gleichung 2.1, Lange (2001)
- `cool(118)` = gesamte Abkühlungsrate auf Strahlungsgitter
- `cooli(118)` = gesamte Abkühlungsrate auf MUAM-Gitter (*warum nicht Länge kgit?*)
- `dnue(17)` =
- `xnue(17)` =

- $y(\text{kgit}+1) = \text{tequib}(\text{kgit}+1) = \text{tn1}$  (Modelltemperatur) jeweils ein Level erhöht
- $x(\text{kgit}+1)$  = zu  $\text{tequib}$  gehörige log-p-Höhe (MUAM-Gitter um ein Level verschoben)
- $\text{bnue}(17,57) =$
- $\text{at}(17) =$
- $\text{bt}(17) =$
- $\text{xnc}(4)$  = Druckverbreitung 0.5-1.0 Laborwerte (Goody'64)
- $\text{coat}=718.7 =$
- $\text{cobt}=0.448 =$
- $\text{codnue}=170. =$
- $\text{cox nue}=667. =$

## 6.4 data\_newCO2.f

aufgerufen in: `irc_60.f`, `species_60.f`

Vorbereitung der Matrixkoeffizienten für  $\text{CO}_2$  Kühlung

Vertikales Gitter mit 93 (z.T. 73) Höhen mit `HLOGPRES` = logarithmische Druckhöhe und Volumenmischungsverhältnisse für  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}$  und  $\text{H}_2\text{O}$  (?)

## 6.5 data\_strobel.f

aufgerufen in: `strobel_60.f`

Solarkonstante, Schumann-Runge-Kontinuum, Parameter für Chapmanfunktion

## 6.6 data\_TMP\_SPW.f

aufgerufen in: `init_60.f` (aber in Folge auskommentiert)

Zonale Mittel und stationäre PW im Temperaturfeld bei 1000hPa Drucklevel aus UKMO-Daten

## 6.7 param\_grid\_60.f

aufgerufen in: `com_main.fc`

Definiert die Gittergrößen: 48 Höhenlevel, 36 Breiten, 64 Längen

## 6.8 pco2o3.f

aufgerufen in: cco2gr.f

Zur Bestimmung der Parametrisierungskoeffizienten für IR  $CO_2$  und  $O_3$  Parametrisierungen.  
Irreguläres Gitter für Höhenintegration genutzt. Offenbar von V.I. Fomichev, im Mai 1996.

## 6.9 udssr.f

aufgerufen in: ircool\_60.f

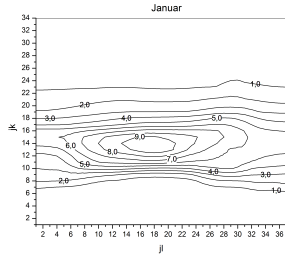
## 6.10 TSMo3\_v02.data

(als einziges im RUN-Ordner)

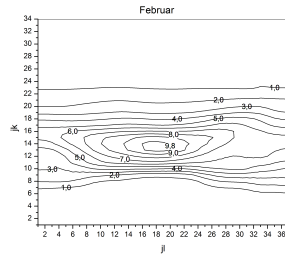
aufgerufen in: O3model\_Berlin\_60.f

Ozonfelder für Januar (1) bis Dezember (12). Gitter: 37 Breiten, 34 Höhen. Aus Ozonesonde +  
CIRA/SBUV data [ppmv]. Quelle: Freie Uni Berlin.

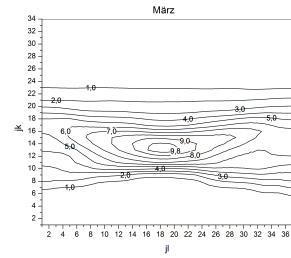
Beinhaltet insbesondere das zweite Ozonmaximum.



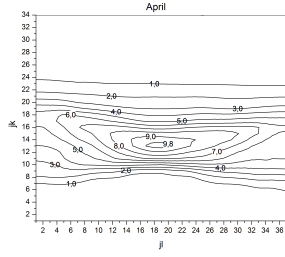
(a) Januar



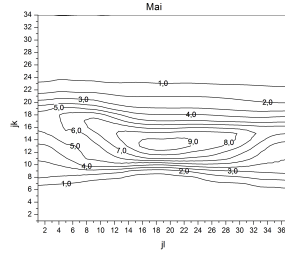
(b) Februar



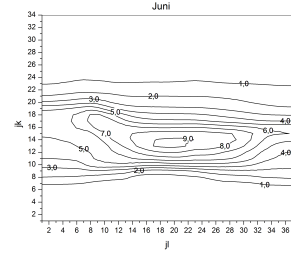
(c) März



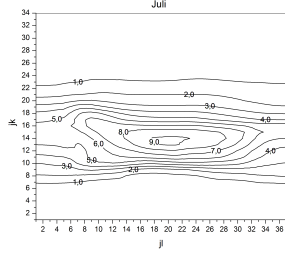
(d) April



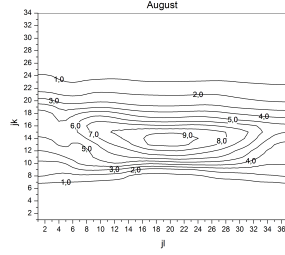
(e) Mai



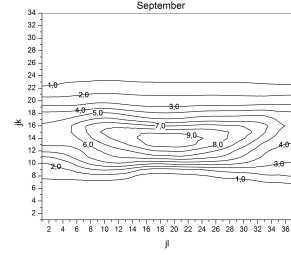
(f) Juni



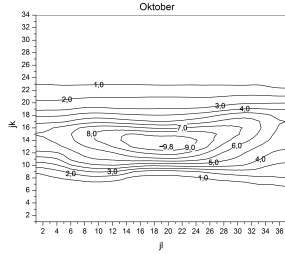
(g) Juli



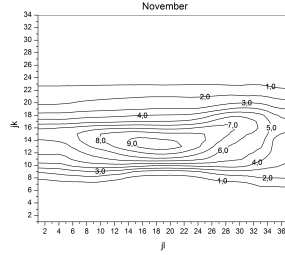
(h) August



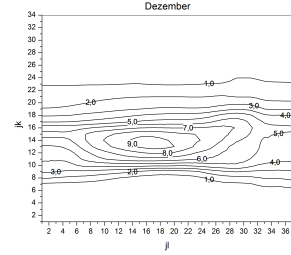
(i) September



(j) Oktober



(k) November



(l) Dezember

**Abb. 11:** Ozonfelder als Volumenmischungsverhältnis aus der Datei TSMo3\_v02.data für Januar bis Dezember.



## 7 Arbeit mit der Shell, Shellskripte

### 7.1 Einstieg Shell

Wenn man ein Terminalfenster öffnet, sieht man zunächst einen schwarzen Bildschirm, in dem `benutzer@Rechner:~$` steht.

Wenn man nun etwas eingibt, z.B.

```
benutzer@Rechner:~$ blablabla
```


Kommando nicht gefunden

dann findet die Konsole kein passendes Kommando.

mit  sieht man den vorherigen Befehl

mit  ist die Zeile wieder schwarz

mit Hilfe  hat man eine automatische Vervollständigung z.B.

```
benutzer@Rechner:~$ cd D 
```

```
benutzer@Rechner:~$ cd Desktop/
```

```
benutzer@Rechner:~$ cd Desktop/T 
```

```
benutzer@Rechner:~$ cd Desktop/Test/
```

Das Ausführen von Programmen erfolgt durch die direkte Eingabe wie folgt:

`benutzer@Rechner:~$ okular Test.pdf` öffnet "Test.pdf" mit Okular. So kann man auch jede andere Datei öffnen. Python Skripte werden z.B. mit

```
benutzer@Rechner:~$ python test.py
```

 ausgeführt und Fortran Codes werden mit

```
benutzer@Rechner:~$ gfortran test.f
```

 kompiliert.

### 7.2 Kommandozeilenbefehle

#### ls: list

Listet den Inhalt des aktuellen Arbeitsverzeichnisses auf, z.B.

```
benutzer@Rechner:~$ ls
```

```
123  abc  Desktop  Einfaches_Beispiel  Einfaches_Beispiel2
```

Es kann auf unterschiedliche Weise benutzt werden.

<code>ls Desktop</code>	listet die Dateien im Desktop-Verzeichnis
<code>ls Desktop/Test</code>	zeigt den Inhalt des Unterordners "Test" an
<code>ls -la..</code>	listet alle Dateien (und verborgene) im aktuellen Arbeitsverzeichnis
<code>ls -l</code>	listet die Dateien im aktuellen Verzeichnis im "lang-Format"

```
benutzer@Rechner:~$ ls -l
```

-rw-r--r--	1	Eigentümer	Gruppe	276480	12. März	123
					13:36	
-rw-r--r--	1	Eigentümer	Gruppe	3	12. März	abc
					13:55	
drwxr-xr-x	3	Eigentümer	Gruppe	4096	6. März	Desktop
					11:24	
-rwxr-xr-x	1	Eigentümer	Gruppe	130	7. März 8:44	Einfaches_Beispiel
-rwxr-xr-x	1	Eigentümer	Gruppe	228	7. März 9:21	Einfaches_Beispiel2

-----	-----	-----	-----	-----	-----
---	---	---	---	---	---
---	---	---	---	---	Dateiname
---	---	---	---	-----	letzte Dateiänderung
---	---	---	-----	-----	Dateigröße in Bytes
---	---	-----	-----	-----	Name der Gruppe die auch
---	---	---	---	---	Zugriff auf die Datei haben
---	-----	-----	-----	-----	Eigentümer
-----	-----	-----	-----	-----	Dateiberechtigung

- erstes Zeichen ist die Art der Datei
- ein “-“ bedeutet ordentliche Datei
- ein “d“ zeigt das Verzeichnis an
- zweite Satz von drei Zeichen stellt die Lese- (r), Schreib- (w) und Ausführungsrechte (x) des Eigentümers dar
- die nächsten drei entsprechend für die Gruppe und die letzten 3 die Rechte für jedermann

Wechselt vom Arbeitsverzeichnis in einen bestimmten Ordner. z.B.

nun befindet der Benutzer sich in Verzeichnis `/home/benutzer/Desktop`. Um nun den Inhalt  
 "Test" anzuschauen reicht es aus

Um ein Verzeichnis nach oben zu springen gibt man

57

Um nun von einem sehr verzweigten Pfad zurück zum Home-Verzeichnis zu kommen, tippt man folgenden Befehl ein:

```
benutzer@Rechner:~/Desktop$ cd $HOME
```

oder einfacher

```
benutzer@Rechner:~/Desktop$ cd .
```

Ein Wechsel in das vorher benutzte Verzeichnis geht mit dem Befehl `benutzer@Rechner:~$ cd -`.

Zusammenfassend:

Desktop	wechsel in das Verzeichnis /home/benutzer/Desktop
<code>cd ..</code>	ein Verzeichnis nach oben springen
<code>cd</code>	wechsel in das "Home-Verzeichnis"
<code>cd -</code>	wechsel in das vorher benutzte Verzeichnis

### cp: copy

In einfachster Form kopiert es eine Datei, man kann es aber auch benutzen um viele Dateien in verschiedene Pfade zu kopieren.

<code>cp 123 abc</code>	kopiert den Inhalt der Datei "123" in die Datei "abc". Falls die Datei "abc" nicht existiert, wird sie erzeugt.
<code>cp -i 123 abc</code>	vor dem kopieren wird man gefragt ob man auch wirklich kopieren will
<code>cp file1 dir1</code>	kopiert die "file1" in den "dir1" z.B. <code>cp 123 Test</code> die Datei "123" in den Ordner "Test"
<code>cp -R dir1 dir2</code>	kopiert den Inhalt von "dir1" in "dir2", wenn "dir2" nicht existiert wird der Ordner erstellt z.B. <code>cp -R Desktop/Test home/benutzer</code> der Inhalt von "Test" wird in den Ordner des Benutzers kopiert

### mv: move

Bewegt Dateien in ein anderes Verzeichnis. Zum einen kann man Dateien umbenennen

```
benutzer@Rechner:~$ mv file1 file2
```

also z.B.

```
benutzer@Rechner:~$ mv Desktop/Test Desktop/Test2
```

dann heißt die Datei oder der Ordner "Test" nun "Test2". Nun kann man auch Dateien/Ordner mit `benutzer@Rechner:~$ mv file1 file2 dir1` verschieben, z.B.

```
benutzer@Rechner:~$ mv 123 Einfaches.Beispiel Desktop/Test/Test3
```

d.h. "123" und "Einfaches\_Beispiel" werden in den Ordner "Test3" verschoben.

Weitere move-Funktionen:

<code>mv file1 file2</code>	der Inhalt von "file2" wird durch den Inhalt von "file1" ersetzt, wenn "file2" nicht existiert dann wird "file1" in "file2" umbenannt.
<code>mv -i file1 file2</code>	vor dem Verschieben wird man gefragt ob man wirklich verschieben möchte
<code>mv file1 file2 file3 dir1</code>	"file1", "file2" und "file3" werden in "dir1" bewegt
<code>mv dir1 dir2</code>	"dir1" wird in "dir2" geschoben, das bedeutet also, dass der Ordner "dir2" nun den Ordner "dir1" enthält. Wenn "dir2" nicht existiert dann wird "dir1" in "dir2" umbenannt.

### **rm: remove**

Mit `rm` können Dateien und Verzeichnisse gelöscht oder entfernt werden.

<code>rm file1 file2</code>	löscht die Dateien "file1" und "file2"
<code>rm -r dir1</code> oder <code>rm -r dir1 dir2</code>	löscht die Verzeichnisse auch wenn diese nicht leer sind
<code>rm -i file1 file2</code>	man wird gefragt ob man wirklich löschen will

Vorsicht mit `rm`! Was einmal gelöscht ist, ist weg!

### **mkdir: make directories**

Mit diesem ShellCommand lassen sich Ordner erstellen.

<code>mkdir dir</code>	erstellt im aktuellen Verzeichnis das Verzeichnis "dir"
<code>mkdir /home/benutzer/Documents</code>	erstellt im Verzeichnis <code>/home/user</code> das Verzeichnis <code>Documents</code>

## 7.3 Bash-Skripte

Die Shell-Skripts beginnen immer mit `#!/bin/sh` und werden in einem Text-Programm wie “KWrite“ erstellt. Shellskripte werden ausführbar gemacht mit

```
benutzer@Rechner:~$ ./script.sh
```

### if Anweisung

Das `if`-Kommando trifft eine Entscheidung auf einem Kommando basierend.

<code>if [ Bedingung ]</code> <code>then Kommando</code> <code>fi</code>	Wenn die Bedingung wahr ist, dann werden die Befehle ausgeführt, ist die Bedingung falsch, wird nichts getan.
<code>if [ Bedingung ]</code> <code>then Kommando</code> <code>else Kommando</code> <code>fi</code>	Wenn die Bedingung wahr ist, dann wird der erste Befehlssatz ausgeführt. Wenn die Bedingung falsch ist, wird der zweite Satz von Befehlen ausgeführt.
<code>if [ Bedingung ]</code> <code>then Kommando</code> <code>elif [ Bedingung ]</code> <code>then Kommando</code> <code>fi</code>	Wenn die Bedingung wahr ist, dann wird der erste Befehlssatz ausgeführt. Wenn die Bedingung falsch ist und die zweite wahr, dann wird der zweite Befehlssatz ausgeführt.

Mit `if` lassen sich auch Vergleiche durchführen. Die wichtigsten Vergleichsoperatoren sind:

Ausdruck	Bedeutung	mathematisches Zeichen	Operator
<code>-eq</code>	equal	=	<code>==</code>
<code>-ne</code>	not equal	≠	<code>!=</code>
<code>-lt</code>	less than	<	<code>&lt;</code>
<code>-gt</code>	greater than	>	<code>&gt;</code>
<code>-le</code>	less equal	≤	<code>&lt;=</code>
<code>-ge</code>	greater equal	≥	<code>&gt;=</code>

## Ein einfaches Beispiel

```
# Demonstriert das if-Kommando mit Zahlenwerten
# Name: avalue
a=6; b=7
if [ $a -eq $b ]
then
    echo \\$a ($a) ist gleich mit \\$b ($b)\
else
    echo \\$a ($a) ist nicht gleich mit \\$b ($b)\
fi

if [ a -gt b ]
then
    echo \\$a ($a) ist größer als \\$b ($b)\
elif [ $a -lt $b ]
then
    echo \\$a ($a) ist kleiner als \\$b ($b)\
else
    echo \\$a ($a) ist gleich mit \\$b ($b)\
fi

if [ $a -ne 5 ]
then
    echo \\$a ($a) ist ungleich 5\
fi

if [ 7 -eq $b ]
then
    echo \\$b ist gleich 7\
fi
```

## **for Schleife**

Mit `for` lassen sich Schleifen erstellen, wie z.B.

```
#!/bin/sh
for var in 1 2 3
do
    echo $var
done

benutzer@Rechner:~$ bash EinfachesBeispiel
1
2
3
```

Variablen wie hier im Beispiel “1 2 3“ werden im Shell-Skript ohne Anführungszeichen geschrieben. Enthält das Shell-Skript Variablen als Text, so wird dieser in Anführungszeichen gesetzt. z.B.

```
#!/bin/sh
for var in \Jan\ \Feb\ \Mar\
do
    echo $var
done

benutzer@Rechner:~$ bash EinfachesBeispiel
Jan
Feb
Mar
```

Der Aufruf von Variablen findet mit `$` statt.

## **sed: Text in externem Dokument ersetzen**

Mit Hilfe des `sed` Befehls lassen sich Worte, Dateinamen, etc. in einer anderen Datei ersetzen. Diese Dateien können z.B. Shell Skripte sein. (Achtung! Nur etwas für fortgeschrittene, denn ändert man an der Grunddatei Worte oder sogar die Zeile, so wirkt sich das auch auf den `sed` Befehl aus!)

Der Aufbau: zu Beginn steht immer `sed` gefolgt von `-i -e`. Am Ende der Zeile steht der Dateiname indem gesucht werden soll. Wird nach einem Text gesucht, so wird der Befehl verwendet, der durch `'s/...'` eingeleitet wird und mit `.../g'` endet.

```
sed -i -e 's/xyz/abc/g' dateiname.sh
```

xyz: das Programm sucht (exakt!) nach dem Text “xyz“ in der Datei “dateiname.sh“

abc: “xyz“ wird durch “abc“ ersetzt

Eine andere Möglichkeit besteht darin, dass nicht ein ganz bestimmter Text gesucht und ersetzt werden soll, sondern Text in einer bestimmten Zeile soll ersetzt werden. Dann beginnt die Zeile wieder mit `sed` und endet mit dem Dateinamen in der gesucht werden soll. Wird nach einer Zeilennummer gesucht, dann wird der Befehl `ZNrc'...'` eingefügt.

```
sed -i -e 123c'neuer Text' dateiname.sh
```

123: Zeilennummer, in der der Text ersetzt wird

neuer Text: hier kommt der Text hin, der danach in der Zeile 123 stehen soll.

Man kann natürlich auch eine Zeile in Datei1 suchen und in der Datei2 ersetzen. Dies geschieht, indem man am Ende statt “dateiname.sh“ einfach “Datei1 > Datei2“ schreibt.

```
sed -i -e 123c'neuer Text' Datei1.sh > Datei2.sh
```

### let: Rechnen mit Variablen

Mit dem `let` Befehl lassen sich Berechnungen mit Hilfe von Shell Skripten und der Konsole machen. Hier sei ein einfaches Beispiel gezeigt:

```
#!/bin/sh
A=2
B=5
let C1=$A+$B
echo $C1
C2=$A+$B
echo $C2

benutzer@Rechner:~$ ./Beispiel3.sh
7
2+5
```

Man sieht an diesem Beispiel, dass die Konsole mit dem Befehle `let` zu Beginn der Zeile rechnet



(es kommt 7 raus). Steht kein `let` davor so gibt die Konsole lediglich den "Text" (2+5) aus.

## 7.4 screen: Rechnen im Hintergrund

Mit **screen** lassen sich mehrere Terminal-Fenster gleichzeitig verwalten. Dazu öffnet man zuerst das Terminal, gibt "screen" ein, möglicherweise muss noch einmal **ENTER** gedrückt werden. Es scheint nun so, als ob nichts geschehen wäre. Das stimmt aber nicht, denn im Hintergrund läuft nun eine weitere Sitzung.

### 7.4.1 Die wichtigsten Befehle

**Strg + a** gefolgt von

<b>c</b> (create)	erstellt ein neues virtuelles Fenster
<b>n</b> (next)	wechselt ins nächste Fenster
<b>p</b> (previous)	wechselt ins vorherige Fenster
<b>N</b> (N=Zahl)	wechselt zu bestimmter Terminal-Nr. beginnend bei 0
<b>”</b>	Übersicht über alle Fenster
<b>A</b>	Fenster benennen
<b>[</b>	Pfeiltasten können zum scrollen verwendet werden
<b>k</b> (kill)	schließt ein bestimmtes Fenster mit der Abfrage <b>Really kill this window [ y/n ]</b>
<b>d</b> (detach)	Zum Abmelden von <b>screen</b> . Läuft aber im Hintergrund weiter, wenn man auf einem Server eingeloggt ist, kann man den PC ausschalten.
<b>?</b>	man erhält eine Übersicht über alle Tastenkürzel

### **7.4.2 Weitere Befehle**

<code>screen -S sitzung1</code>	Startet eine neue Sitzung mit dem Namen "sitzung1"
<code>screen -r</code>	öffnet die Sitzung, falls mehrere Sitzungen offen sind, werden die IP's angezeigt → <code>screen -r &lt;IP&gt;</code>
<code>screen -r sitzung1</code>	nimmt die Sitzung mit dem Namen "sitzung1" wieder auf
<code>screen -ls</code>	listet die Namen aller laufenden Screen-Sitzungen auf
<code>ps fax</code>	sucht alle aktuellen Sitzungen

## 7.5 Die wichtigsten Konsolenbefehle zusammengefasst

Befehl &	man kann die Konsole weiter benutzen, z.B. <code>benutzer@Rechner:~\$ okular &amp;</code> öffnet Okular und Konsole kann weiterhin bedient werden
bg	schiebt die offenen Programme in den Hintergrund
cd dir	wechselt in das Verzeichnis "dir"
..	wechselt ein Verzeichnis höher
-	wechselt in das vorherige Verzeichnis
cp file dir	Kopiert Datei "file" in das Verzeichnis "dir"
mv	verschiebt die Datei
file1 file2	benennt Datei "file1" in "file2" um
rm	löscht eine Datei
mkdir	erzeugt ein Verzeichnis
rmdir	löscht ein Verzeichnis
ls	zeigt Ordnerinhalt an
-a	zeigt alle Ordnerinhalte inkl. der versteckten Ordner an
-l	ausführliche Auflistung der Dateien und Ordner im aktuellen Verzeichnis
-la	zeigt alle Dateien des Verzeichnisses ausführlich
pwd	Zeigt das aktuelle Verzeichnis

## Literaturverzeichnis

- Akmaev, R. A.: *Seasonal variations of the terdiurnal tide in the mesosphere and lower thermosphere: a model study*, Geophysical Research Letters, 28, 3817–3820, doi:10.1029/2000JD900519, 2001.
- Andrews, D. G., Holton, J. R., und Leovy, C. B.: *Middle atmosphere dynamics*, Academic Press, XI, 489 Seiten, 1987.
- Becker, E.: *Sensitivity of the upper mesosphere to the Lorenz energy cycle of the troposphere*, Journal of the Atmospheric Sciences, 66, 647–666, doi:10.1175/2008JAS2735.1, 2009.
- Berger, U.: *Numerische Simulation klimatologischer Prozesse und thermischer Gezeiten in der mittleren Atmosphäre*, Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 1994.
- Berger, U.: *Modeling of middle atmosphere dynamics with LIMA*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 70, 1170–1200, doi:10.1016/j.jastp.2008.02.004, 2008.
- Fomichev, V. und Shved, G.: *Parameterization of the radiative flux divergence in the 9.6  $\mu\text{m}$   $\text{O}_3$  band*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 47, 1037 – 1049, doi: 10.1016/0021-9169(85)90021-2, 1985.
- Fomichev, V. I., Ward, W. E., Beagley, S. R., McLandress, C., McConnell, J. C., McFarlane, N. A., und Shepherd, T. G.: *Extended Canadian Middle Atmosphere Model: Zonal-mean climatology and physical parameterizations*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 107, ACL 9–1–ACL 9–14, doi:10.1029/2001JD000479, 2002.
- Fortuin, J. P. und Langematz, U.: *An update on the global ozone climatology and on concurrent ozone and temperature trends*, Proc. SPIE, 2311, 207–216, doi:10.1117/12.198578, 1994.
- Freidenreich, S. M. und Ramaswamy, V.: *A new multiple-band solar radiative parameterization for general circulation models*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 104, 31,389–31,409, doi:10.1029/1999JD900456, 1999.
- Fröhlich, K.: *The Quasi Two-Day Wave - its impact on the zonal mean circulation and wave-wave interactions in the middle atmosphere*, Dissertation, University of Leipzig, 2005.
- Fröhlich, K. und Jacobi, C.: *The solar cycle in the middle atmosphere: changes of the mean circulation and of propagation conditions for planetary waves*, Wiss. Mitt. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig, [www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/2004\\_LIM\\_1.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~jacobi/docs/2004_LIM_1.pdf), 2004.

- Fröhlich, K., Pogoreltsev, A., und Jacobi, C.: 161–189 *The 48 Layer COMMA–LIM Model: Model description, new Aspects, and Climatology*, Wiss. Mitt. Inst. f. Meteorol. Univ. Leipzig, [www.uni-leipzig.de/%7Ejacobi/medec/2003.COMMA.LIM.pdf](http://www.uni-leipzig.de/%7Ejacobi/medec/2003.COMMA.LIM.pdf), 2003.
- Fytterer, T., Arras, C., Hoffmann, P., und Jacobi, C.: *Global distribution of the migrating ter-diurnal Tide seen in sporadic E occurrence frequencies obtained from GPS radio occultations*, Earth, Planets and Space, doi:10.1186/1880-5981-66-79, 2014.
- Gassmann, A.: *A global hexagonal C-grid non-hydrostatic dynamical core (ICON-IAP) designed for energetic consistency*, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 139, 152–175, 2013.
- Gavrilov, N. M. und Fukao, S.: *A Comparison of Seasonal Variations of Gravity Wave Intensity Observed by the MU Radar with a Theoretical Model*, Journal of the Atmospheric Sciences, 56, 3485–3493, 1999.
- Hagan, M. E. und Forbes, V. F.: *On modeling migrating solar tides*, Geophysical Research Letters, 22, 893–896, doi:10.1029/95GL00783, 1995.
- Hodges, R. R.: *Generation of turbulence in the upper atmosphere by internal gravity waves*, Journal of Geophysical Research, 72, 3455–3458, doi:10.1029/JZ072i013p03455, 1967.
- Hodges, R. R.: *Eddy diffusion coefficients due to instabilities in internal gravity waves*, Journal of Geophysical Research, 74, 4087–4090, doi:10.1029/JA074i016p04087, 1969.
- Hoffmann, P.: *Planetary Wave Coupling between Stratosphere and Ionosphere by Gravity Wave Modulation*, Dissertation, Universität Leipzig, 2011.
- Holton, J. R.: *A Semi-Spectral Numerical Model for Wave-Mean Flow Interactions in the Stratosphere: Application to Sudden Stratospheric Warmings*, Journal of the Atmospheric Sciences, 33, 1639–1649, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1639:ASSNMF>2.0.CO;2v, 1976.
- Holton, J. R. und Zhu, X.: *A Further Study of Gravity Wave Induced Drag and Diffusion in the Mesosphere*, Journal of the Atmospheric Sciences, 41, 2653–2662, doi:10.1175/1520-0469(1984)041<2653:AFSOGW>2.0.CO;2, 1984.
- Huang, T. Y. W. und Smith, A. K.: *The Mesospheric Diabatic Circulation and the Parameterized Thermal Effect of Gravity Wave Breaking on the Circulation*, Journal of the Atmospheric Sciences, 48, 1093–1111, doi:10.1175/1520-0469(1991)048<1093:TMDCAT>2.0.CO;2, 1991.
- Hunt, B. G.: *The impact of gravity wave drag and diurnal variability on the general circulation of the middle atmosphere*, Journal of the Atmospheric Sciences, 64, 1–16, doi:10.1175/1520-0469(1991)048<1093:TMDCAT>2.0.CO;2, 1986.

- Jakobs, H. J.: *Untersuchungen von Schwerewelleneffekten mit Hilfe eines 3-d Zirkulationsmodells der mittleren Atmosphäre*, Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln, 1986.
- Jakobs, H. J., Bischof, M., Ebel, A., und Speth, P.: *Simulation of gravity wave effects under solstice conditions using a 3-D circulation model of the middle atmosphere*, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 48, 1203–1223, doi:10.1016/0021-9169(86)90040-1, 1986.
- Lange, M.: Modellstudien zum CO<sub>2</sub>-Anstieg und O<sub>3</sub>-Abbau in der mittleren Atmosphäre und Einfluss des Polarwirbels auf die zonale Symmetrie des Windfeldes in der Mesopausenregion, Dissertation, University of Leipzig, [www.uni-leipzig.de/~meteo/de/orga/band25.pdf](http://www.uni-leipzig.de/~meteo/de/orga/band25.pdf), 2001.
- Lindzen, R. S.: *The application of classical atmospheric tidal theory*, Proceedings of the Royal Society, 303, 299–316, 1968.
- Lindzen, R. S.: *Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown*, Journal of Geophysical Research: Oceans, 86, 9707–9714, doi:10.1029/JC086iC10p09707, 1981.
- Liou, K.-N.: *Radiation and Cloud Processes in the Atmosphere: Theory, Observation and Modeling*, Oxford Monographs on Geology and Geophysics, 1992.
- Longuet-Higgins, M.: *The Eigenfunctions of Laplace's Tidal Equations over a Sphere*, Phil. Trans. R. Soc. Lond., 262, 511–607, doi: 10.1098/rsta.1968.0003, 1968.
- Marsh, D. R., Mills, M. J., Kinnison, D. E., Lamarque, J.-F., Calvo, N., und Polvani, L. M.: *Climate Change from 1850 to 2005 Simulated in CESM1(WACCM)*, Journal of Climate, 26, 7372–7391, doi:10.1175/JCLI-D-12-00558.1, URL <http://dx.doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00558.1>, 2013.
- Matsuno, T.: *Numerical Integrations of the Primitive Equations by a Simulated Backward Difference Method*, J. Meteor. Soc. Jap., 44, 76–84, 1966.
- Medvedev, A. S. und Klaassen, G. P.: *Thermal effects of saturating gravity waves in the atmosphere*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 108, ACL 4–1–ACL 4–18, doi:10.1029/2002JD002504, 2003.
- Mlynczak, M. G. und Solomon, S.: *A detailed evaluation of the heating efficiency in the middle atmosphere*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 98, 10,517–10,541, doi:10.1029/93JD00315, 1993.
- Ogibalov, V., Fomichev, V. I., und Kutepov, A.: *Radiative Heating affected by Infrared CO<sub>2</sub> bands in the middle and upper atmosphere*, Izvestiya, Atmospheric and Ocean Physics, 34, 454–464, 2000.

- Plumb, R. A.: *A New Look at the Energy Cycle*, Journal of the Atmospheric Sciences, 40, 1669–1688, doi:10.1175/1520-0469(1983)040<1669:ANLATE>2.0.CO;2, 1983.
- Pogoreltsev, A., Savenkova, E., und Pertsev, N.: *Sudden stratospheric warmings: the role of normal atmospheric modes*, Geomagnetism and Aeronomy, 54, 357–372, doi: 10.1134/S0016793214020169, 2014.
- Pogoreltsev, A. I. und Pertsev, N. N.: *The influence of background wind on the formation of the acoustic-gravity wave structure in the thermosphere*, Atmospheric and Oceanic Physics, 31, 723–728, 1996.
- Pogoreltsev, A. I., Vlasov, A. A., Fröhlich, K., und Jacobi, C.: *Planetary waves in coupling the lower and upper atmosphere*, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 69, 2083–2101, doi: 10.1016/j.jastp.2007.05.014, 2007.
- Richards, P. G., Fennelly, J. A., und Torr, D. G.: *EUVAC: A Solar EUV Flux Model for aeronomic calculations*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 99, 8981–8992, doi:10.1029/94JA00518, 1994a.
- Richards, P. G., Fennelly, J. A., und Torr, D. G.: *Correction to “EUVAC: A Solar EUV Flux Model for aeronomic calculations”*, Journal of Geophysical Research: Space Physics, 99, 13,283, doi:10.1029/94JA01446, 1994b.
- Roble, R. G.: *Energetics of the Mesosphere and Thermosphere*, Geophysical Monograph, 87, 1–21, doi:10.1029/GM087p0001, 1995.
- Roble, R. G. und Ridley, E. C.: *A thermosphere-ionosphere-mesosphere-electrodynamics general circulation model (time-GCM): Equinox solar cycle minimum simulations (30-500 km)*, Geophysical Research Letters, 21, 417–420, 1994.
- Rose, K.: *On the influence of nonlinear wave-wave interactions in a 3-D primitive equation model for Sudden stratospheric warmings*, Beiträge zur Physik der Atmosphäre, 56, 14–41, 1983.
- Schmidt, H., Brasseur, G., Charron, M., Manzini, E., Giorgetta, M., und Diehl, T.: *The HAMMONIA Chemistry Climate Model: Sensitivity of the Mesopause Region to the 11-Year Solar Cycle and CO<sub>2</sub> Doubling*, Journal of Climate, 19, 3903–3931, doi:10.1175/JCLI3829.1, 2006.
- Schoeberl, M. R., Strobel, D. F., und Apruzese, J. P.: *A numerical model of gravity wave breaking and stress in the mesosphere*, Journal of Geophysical Research, 88, 5249–5259, 1983.
- Smyshlyaev, S. und Geller, M. A.: *Analysis of SAGE II observations using data assimilation by the SUNY-SPB two dimensional model and comparison to TOMS data*, Journal of Geophysical Research, doi: 10.1029/2001JD000353, 2001.

- Strobel, D. F.: *Parameterization of the atmospheric heating rate from 15 to 120 km due to O<sub>2</sub> and O<sub>3</sub> absorption of solar radiation*, Journal of Geophysical Research: Oceans, 83, 6225–6230, doi:10.1029/JC083iC12p06225, 1978.
- Swarztrauber, P. N. und Kasahara, A.: *The Vector Harmonic Analysis of Laplace's Tidal Equations*, SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing, 6, 464–491, doi:10.1137/0906033, 1985.
- Yigit, E., Medvedev, A., Aylward, A., Hartogh, P., und Harris, M.: *Modeling the effects of gravity wave momentum deposition on the general circulation above the turbopause*, Journal of Geophysical Research, 114, D07 101, doi:10.1029/2008JD011132, 2009.
- Yigit, W., Aylward, A., und Medvedev, A.: *Parameterization of the effects of vertically propagating gravity waves for thermosphere general circulation models: Sensitivity study*, Journal of Geophysical Research, 113, D19 106, doi:10.1029/2008JD010135, 2008.
- Zhu, X.: *Radiative Damping Revisited: Parameterization of Damping Rate in the Middle Atmosphere*, Journal of the Atmospheric Sciences, 50, 3008–3021, doi:10.1175/1520-0469(1993)050<3008:RDRPOD>2.0.CO;2, 1993.