

FAST-O3: Fast stratospheric ozone chemistry for global climate models

Schlussbericht (Phase I)

Förderkennzeichen 01LP1137B

Laufzeit 01.09.2011-31.08.2015

I. Kurze Darstellung

I.1. Aufgabenstellung

Die Berücksichtigung der atmosphärischen Ozonchemie in Wetter- und Klimamodellen ist für eine realistische Simulation des Atmosphärenzustandes bekanntermaßen wesentlich. Mithilfe von interaktiv gekoppelten Klima-Chemiemodellen (engl.: Chemistry Climate Model - CCM) lässt sich das Zusammenspiel von atmosphärischer Chemie und Dynamik realistisch simulieren. Solche CCMs benötigen jedoch viel Rechenzeit, so dass die Nutzung von Modellen mit komplexer Chemie in Ensemblesimulationen oder vielfältigen Klimaänderungsszenarien meist nicht möglich ist. In solchen Simulationen wird Ozon oft als Randbedingung vorgeschrieben, wobei das Ozonfeld nicht mit der vom Modell simulierten atmosphärischen Dynamik übereinstimmt. Dadurch wird der Einfluss von stratosphärischem Ozon auf die troposphärische Klimavariabilität unterschätzt und Wechselwirkungen zwischen Ozon und Klima auf dekadischer Zeitskala bleiben unberücksichtigt. Vorhandene schnelle Ozonschemata basieren meist auf der Annahme kleiner Änderungen eines bekannten gemittelten Zustands und sind zu sehr vereinfacht um sie außerhalb der Klimatologie, für die sie entwickelt wurden, zu nutzen.

Vom Projektpartner AWI wurde eine neue Methode stratosphärische Chemie in Klimamodellen zu berücksichtigen (SWIFT; Rex *et al.*, 2014) entwickelt. In FAST-O3 sollte diese bisher für den Polarwirbel entwickelte Methode für extrapolare Breiten weiterentwickelt und in das Klimamodell EMAC eingebaut werden.

I.2. Voraussetzungen

Entscheidungsträger in Politik, Gesellschaft und Wirtschaft benötigen für ihre Entscheidungen und Planungssicherheit oft Informationen über die zukünftige Entwicklung des Klimas auf Zeitskalen einiger Dekaden, zum Beispiel zur Risikoanalyse im Versicherungsbereich. Während Vorhersagen auf längeren Zeitskalen (Klimamodelle) und kürzeren Zeitskalen (Wettervorhersage) gut etabliert sind, sind Vorhersagen auf dekadischen Zeitskalen eine Herausforderung, unter anderem durch

die natürliche Klimavariabilität auf diesen Zeitskalen durch zum Beispiel interne Schwingungen, Vulkane, solare Variabilität, aber auch durch Ozon. Daher wurden im Modul B des MiKlip-Projekts diese Einflüsse tiefer untersucht und im Falle von Ozon eine neue Modellparametrisierung entwickelt, die die wichtigen Wechselwirkungen zwischen Ozon und Klima berücksichtigen kann.

I.3. Planung und Ablauf

Der zeitliche Ablauf des Vorhabens ist der folgenden Tabelle zu entnehmen. Gegenüber der ursprünglichen Zeitplanung im Antrag stellt diese Tabelle eine überarbeitete und genehmigte Version dar, die durch eine Verzögerung in der Bewilligung der Projektmittel notwendig wurde.

Monat	Jahr 1												Jahr 2												Jahr 3												Jahr 4												
	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
1.1																																																	
1.2																																																	
2.1																																																	
2.2																																																	
3.1																																																	
3.2																																																	
3.3																																																	
4																																																	
5																																																	

Das Projekt ist in 5 Workpackages und verschiedene Tasks aufgeteilt:

WP1: Formulierung von SWIFT für polare Breiten (AWI)

- 1.1 Berechnung höhenabhängiger Koeffizienten für das polare SWIFT
- 1.2 Ergänzung der Euler'schen Ozonadvektion

WP2: Ausdehnung von SWIFT auf extrapolare Breiten (AWI)

- 2.1 Entwicklung eines extrapolaren Chemiemoduls
- 2.2 Kopplung mit Lagrange'schem Transport

WP3: SWIFT/GCM-Kopplung (FU Berlin)

- 3.1 Kopplung von SWIFT an EMAC und EMAC-O
- 3.2 Simulationsrechnungen mit gekoppeltem EMAC-SWIFT
- 3.3 Integration von SWIFT in das MiKlip Prototyp System

WP4: Beurteilung und Validierung von EMAC-SWIFT (FU Berlin)

WP5: Beurteilung der Bedeutung von Ozon/Klimawechselwirkungen für dekadische Vorhersagen (AWI und FU Berlin)

WPs 1 und 2 wurden vom AWI durchgeführt, WPs 3 und 4 waren Aufgabe der FU Berlin. WP5 ist ein gemeinsames Workpackage. Die Koordination auf AWI-Seite lag bei Dr. Markus Rex. WP1 wurde von Dr. Ingo Wohltmann bearbeitet, WP2 im Rahmen einer Doktorarbeit von Daniel Kreyling. Die Koordination auf FU-Seite lag bei Prof. Dr. Ulrike Langematz. WPs 3 und 4 wurden im Rahmen einer Doktorarbeit von Janice Scheffler bearbeitet.

Folgende Milestones waren vereinbart:

M1: Polares SWIFT Modul in funktionalem Zustand und getestet mit ECMWF-Daten

M2: Globales SWIFT Modell in funktionalem Zustand und getestet mit ECMWF-Daten

M3: Gekoppeltes System EMAC-SWIFT in funktionalem Zustand und getestet in kurzen Läufen

M4: Lange Läufe des gekoppelten Systems EMAC-SWIFT und EMAC-O-SWIFT verfügbar

M5: Bericht zur Rolle von Ozon-Klima-Wechselwirkungen in mittelfristigen Ensemble-Vorhersagen

Der erfolgreiche Abschluss der Modellentwicklung und der Validierung mit ECMWF- und MLS-Satellitendaten in Workpackage 1 (Milestone M1) und in geringerem Maße von Workpackage 2 (Milestone M2) war Voraussetzung für die Implementierung in EMAC. Beide Milestones konnten planmäßig vom AWI erreicht werden (Juni und Dezember 2013). Eine erste Version des extrapolierten SWIFT-Modells wurde zunächst nur in ATLAS implementiert und getestet, so dass in EMAC nur das polare Modul implementiert wurde. Die Milestones M3 und M4 wurden von der FU Berlin erreicht.

Der überarbeitete Zeitplan konnte weitgehend eingehalten werden. Folgende Abweichung hat sich während des Projektverlaufs ergeben:

Task 3.3, Workpackage 5 und Milestone M5 mussten aufgrund einer Entscheidung der Projektkoordination, mehrere der in Modul B entwickelten Module nicht in das MiKlip-Modellsystem zu integrieren, entfallen.

Das Projekt wird im Rahmen von MiKlip II im Projekt FAST-O3-II fortgeführt. Dies umfasst eine weitere Verbesserung des polaren und extrapolierten SWIFT-Modells, die Implementierung in MPI-ESM1.1 und die Bereitstellung von Ozonfeldern für das MiKlip-Modellsystem.

I.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Die Relevanz von Wechselwirkungen zwischen dem Klima und der Ozonschicht auf dekadischen Zeitskalen ist seit langem bekannt. Stratosphärisches Ozon ist wichtig für die Strahlungsbilanz der Erde und hat einige der Effekte des langjährigen CO₂-Anstiegs modifiziert. So beeinflusst der antarktische Ozonabbau Temperaturtrends auf dem antarktischen Kontinent und die großräumigen Zirkulationsmuster (*Thompson und Solomon, 2002*). Bisher werden diese Wechselwirkungen in Klimamodellen aus Rechenzeitgründen im allgemeinen nicht berücksichtigt, insbesondere auch nicht in den Modellen, auf denen die Empfehlungen des IPCC-Reports beruhen, bei denen langjährige und Szenarienläufe notwendig sind. Diese Modelle verwenden eine fest vorgegebene, nicht interaktive Ozonschicht. Die Nutzung eines vollen stratosphärischen Klima-Chemie-Modells (CCM) ist rechnerisch sehr aufwändig und wird daher nur für Einzelstudien verwendet. Existierende

schnelle Ozon-Chemie-Modelle, wie das Cariolle-Schema (z.B. *Cariolle und Teyssedre*, 2007) oder Linoz (z.B. *McLinden et al.*, 2000), die vereinzelt in Klimamodellen benutzt werden, haben diverse Nachteile: Sie gehen im Allgemeinen davon aus, dass es nur zu kleinen Abweichungen von einer vorgegebenen klimatologischen Ozonverteilung kommen kann. Das heißt Ozonänderungen werden mathematisch mithilfe einer Taylor-Entwicklung berechnet und beruhen nicht auf den chemischen und physikalischen Prozessen, die tatsächlich ablaufen. Sie enthalten oft nicht die polare Ozonchemie, die zum Ozonloch führt, und können weder Nichtlinearitäten noch die Vorgeschichte des momentanen Zustands berücksichtigen. Daher wurde am Alfred-Wegener-Institut bereits vor Projektbeginn mit der Entwicklung des auf Differentialgleichungen beruhenden polaren Ozon-Chemie-Modells SWIFT begonnen (*Rex et al.*, 2014). Dieses wurde im Rahmen des FAST-O3-Projekts weiterentwickelt, um ein extrapolares Modell ergänzt und in das EMAC-Modell implementiert.

Das ECHAM/ MESSy Atmospheric Chemistry (EMAC)-Modell ist ein globales Klima-Chemie-Modell (engl. chemistry climate model – CCM), welches über das MESSy Interface (*Jöckel et al.*, 2006) mit Submodellen gekoppelt werden kann, welche beispielsweise die Strahlung, Schwerewellenparametrisierungen oder die atmosphärische Chemie beschreiben. Mit der MESSy-Infrastruktur ist es möglich einzelne Submodelle an- und auszuschalten. Innerhalb von FAST-O3 wurde ein neues MESSy-Submodell für SWIFT entwickelt. EMAC kann damit sowohl mit komplexer Chemie als auch mit SWIFT-Chemie verwendet werden, wobei alle anderen Modellkomponenten unverändert sind. Der Transport von chemischen Tracern erfolgt in EMAC mit einem semi-Lagrange'schem Transportschema (*Lin and Rood*, 1996).

I.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurde das vorhandene polare SWIFT-Modul vom Projektpartner AWI weiterentwickelt und in Fortran übersetzt um es EMAC anwenden zu können. Weitere Kooperationen erfolgten mit dem Projekt STRATO.

II Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses

Das polare SWIFT-Modul (WP1, AWI)

Für das vor Projektbeginn vorhandene polare SWIFT-Modul wurde eine neue Parametrisierung der Modellgleichungen entwickelt. Diese wurde in Fortran übersetzt um sie in EMAC einbinden zu können. Für eine detaillierte Darstellung von WP1 wird auf den Schlussbericht von Partner AWI zum Projekt FAST-O3 verwiesen.

Das extrapolare SWIFT-Modul (WP2, AWI)

Ein extrapolares SWIFT-Modul wurde neu entwickelt und erfolgreich gegen Beobachtungsdaten validiert. Das extrapolare Modul liegt bisher noch nicht in Fortran vor und kann somit noch nicht im EMAC verwendet werden. Für eine detaillierte Darstellung von WP2 wird auf den Schlussbericht von Partner AWI zum Projekt FAST-O3 verwiesen.

Implementierung von SWIFT in das EMAC-Modell (WP3, FUB)

Das polare SWIFT-Modul konnte erfolgreich in das Klima-Chemie-Modell EMAC eingebaut werden. Dafür wurde ein neues Submodul geschrieben, welches SWIFT durch die MESSy-Infrastruktur mit den anderen Komponenten des EMAC-Modellsystems verbindet und den Aufruf der SWIFT-Chemie regelt. Das Submodul benutzt zurzeit lediglich die polare SWIFT-Chemie, ist aber bereits so konzipiert, dass es auch für den Einsatz der globalen SWIFT-Chemie und für den Lagrange'schen Transport von ATLAS anwendbar ist, sobald diese für EMAC einsetzbar sind. Derzeit werden innerhalb des Polarwirbels der semi-Lagrange'sche Transport von EMAC und die von SWIFT als Polarwirbelmittel berechnete chemische Ozonänderungsrate und außerhalb des Polarwirbels die Ozonklimatologie von *Fortuin und Langematz* (1995, hiernach FL95) verwendet.

Die Polarwirbelgrenze wird mit Hilfe der modifizierten Potentiellen Vortizität (PV) nach *Lait* (1996) bestimmt. Als geeigneter Grenzwert zur Bestimmung der Wirbelgrenze hat sich eine modifizierte PV von 36 PVU herausgestellt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft für einen Tag im Nordwinter einer Testsimulation mit EMAC-SWIFT die Ozonverteilung in einem Modelllevel, in dem SWIFT angewandt wird. Links oben wird eine polarstereographische Darstellung des Ozonfeldes im Modelllevel 20 (~ 42 hPa) gezeigt, die weiße Linie kennzeichnet die Polarwirbelgrenze bei 36 PVU. Man erkennt transportbedingte zonal-asymmetrische Strukturen innerhalb des Polarwirbels und zonalgemittelte Strukturen außerhalb des Polarwirbels, wo das Ozonfeld der zonalgemittelten Klimatologie von FL95 entspricht.

Der zeitliche Verlauf der chemischen Spezies, deren Mischungsverhältnisse in den Differentialgleichungen von SWIFT berechnet werden, ist in Abbildung 2 dargestellt. Zu Beginn des Winters 1990/91 werden die SWIFT-Spezies mit Klimatologien initialisiert. Diese Initialisierung erfolgt für O_3 , HNO_3 und H_2O mit MLS-Klimatologien für den Zeitraum 2005-2014 und für HCl , $ClNO_3$ und Cl_y mit Klimatologien aus Simulationen mit dem CTM ATLAS für die Jahre 2005-2006. Ist die Temperatur innerhalb des Polarwirbels so weit gesunken, dass die Bildung polarer stratosphärischer Wolken (engl.: polar stratospheric clouds (PSCs)) möglich ist, steigt der Anteil des Wirbels, der von PSCs bedeckt ist (FAP), an. Der Anteil des Polarwirbels, der von Sonnenlicht bedeckt ist (FAS), ist zu diesem Zeitpunkt noch relativ gering. Mit der Bildung der PSCs kommt es zu heterogenen Reaktionen von HCl und $ClNO_3$ an der Oberfläche der PSCs, wodurch es zur Bildung der aktiven Chlorspezies ClO_x kommt.

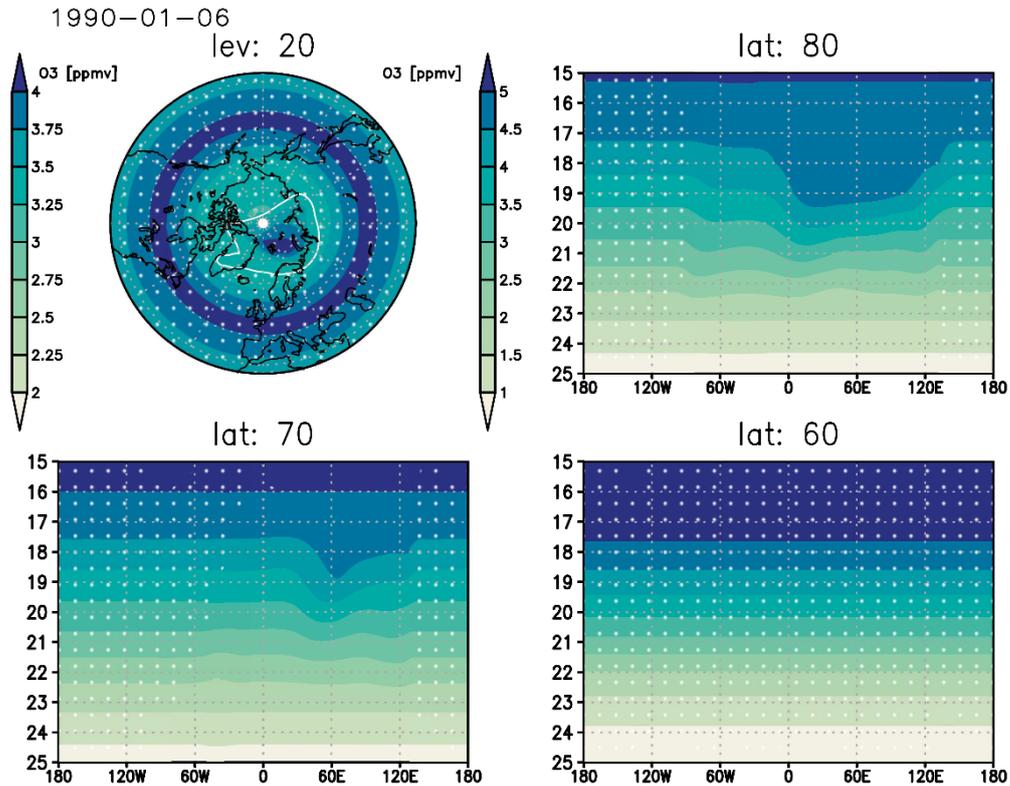


Abbildung 1: Ozon [ppmv] in EMAC-SWIFT am Modelltag 06.01.1990. Punktierete Flächen weisen eine modifizierte PV von unter 36 PVU aus, liegen also außerhalb des Polarwirbels. **Oben links:** Polarstereographische Darstellung im Modelllevel 20 (~42 hPa). Weiße Linie: 36 PVU. **Oben rechts:** Höhen-Längen-Querschnitt bei 80°N. Höhenlevel in Modelllevel von Modelllevel 15 (~10 hPa) bis 25 (~140 hPa). **Unten links:** Wie oben rechts, aber bei 70°N. **Unten rechts:** Wie oben rechts, aber bei 60°N.

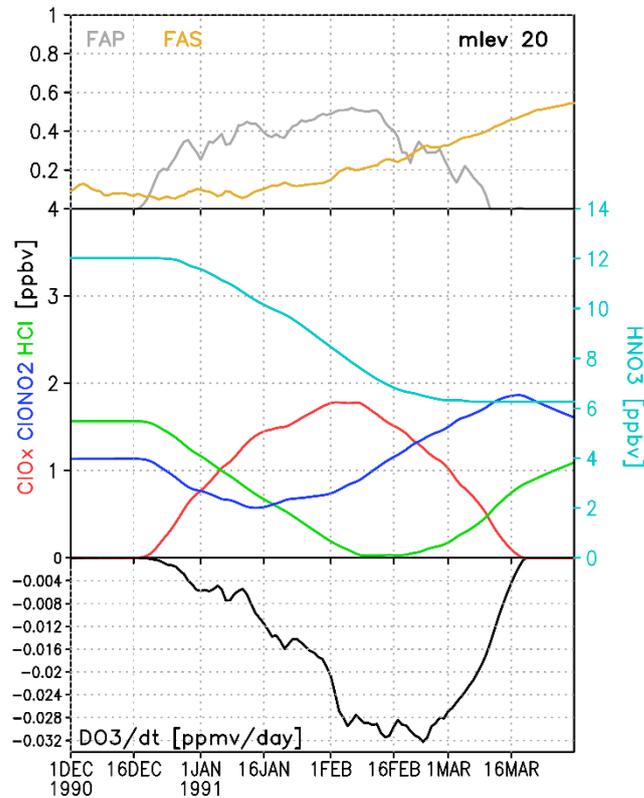


Abbildung 2: Zeitliche Entwicklung der SWIFT-Spezies im nordhemisphärischen Winter 1990/1991 für das Modelllevel 20 (~42 hPa).

Mit dem Anstieg von ClO_x und FAS, kommt es zur Ozonzerstörung. Die Evaporation der PSCs am Ende des Winters führt zur Umwandlung der aktiven Chlorspezies in die Reservoirspezies.

Es wurden Test- und Validierungsläufe mit EMAC-SWIFT für diese Konfiguration durchgeführt. Die Rechenzeit von EMAC-SWIFT entspricht dabei der von EMAC ohne interaktive Chemie.

Validierung von EMAC-SWIFT (WP4, FUB)

Zur Validierung von EMAC mit polarem SWIFT wurden zunächst mehrjährige transiente Simulationen durchgeführt, welche auf eine RCP6.0-Simulation mit EMAC mit komplexer Chemie aufsetzt. Die Simulation umfasst den Zeitraum Mai 1989 bis April 2000, d.h. 11 nord- und südhemisphärische Winter. Außerhalb des Zeitraumes, in dem das polare SWIFT angewandt wird, wurde die Ozonklimatologie von FL95 verwendet.

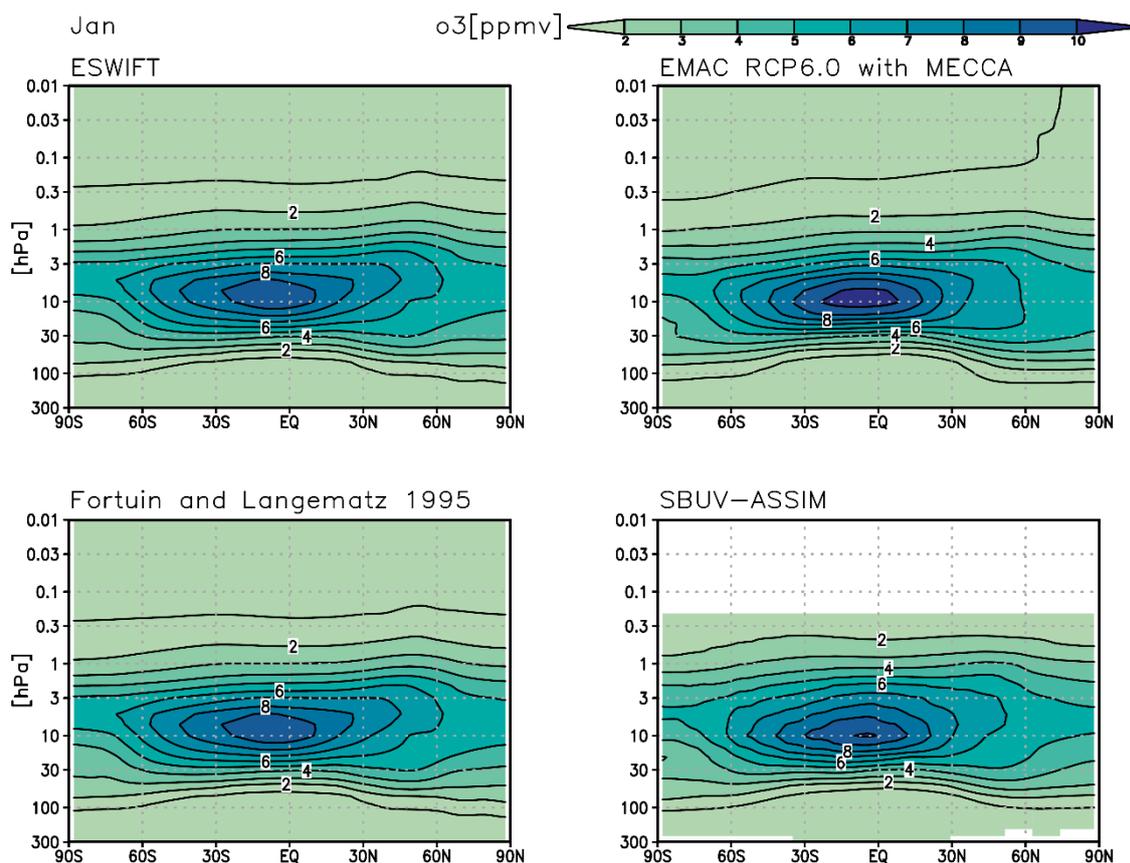


Abbildung 3: Langjähriges Januarmittel des Ozon-Mischungsverhältnisses [ppmv] für die Simulation mit EMAC-SWIFT (links oben), EMAC mit komplexer Chemie (rechts oben), Klimatologie nach Fortuin and Langematz (1995) (links unten) und assimilierten SBUV-Daten nach Kiesewetter et al. (2010) (rechts unten).

Abbildung 3 zeigt die zonal gemittelten langjährigen Mittel der EMAC-Simulation mit SWIFT-Chemie im Vergleich zur Klimatologie nach FL95, assimilierten SBUV-Daten nach *Kiesewetter et al.* (2010, kurz SBUV-ASSIM) und einer EMAC-Simulation mit komplexer Chemie. In der unteren polaren Stratosphäre, wo SWIFT angewandt wird, erkennt man in der EMAC-SWIFT-Simulation leicht höhere Ozon-Mischungsverhältnisse als in der Klimatologie von FL95. Differenzen der EMAC-SWIFT-Simulation zur FL95-Klimatologie sind in Abbildung 4 dargestellt.

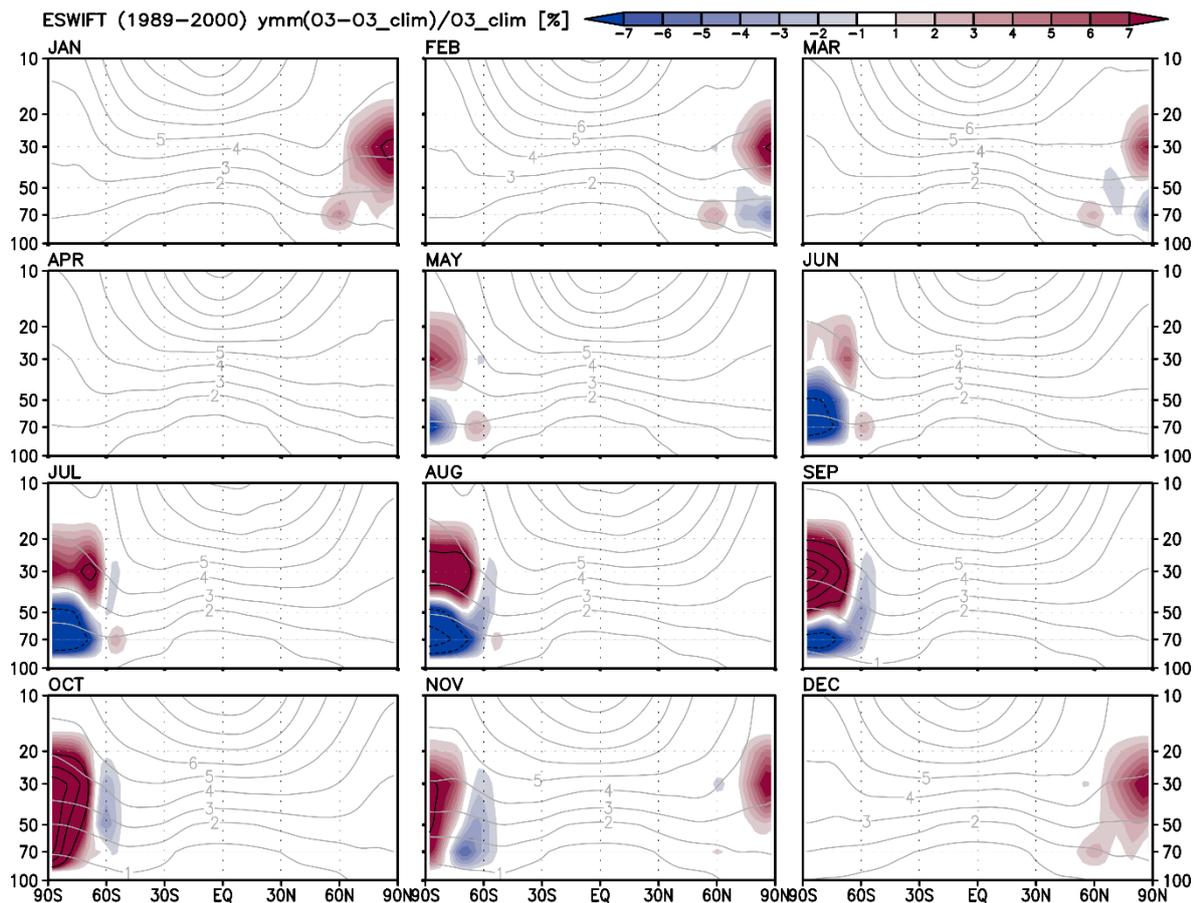


Abbildung 4: Differenz des zonal gemittelten Ozonfeldes der EMAC-SWIFT-Simulation zur Klimatologie von FL95 [%], schattiert und schwarze Isolinien (Abstand 10%). Graue Linien: Zonal gemitteltes Ozon in der EMAC-SWIFT-Simulation [ppmv].

Abbildung 4 zeigt den prozentualen Unterschied des Ozonfeldes in der EMAC-SWIFT-Simulation im Vergleich mit der Klimatologie nach FL95. In der Nordhemisphäre ist das Ozon-Mischungsverhältnis in den Monaten Januar und Februar am Pol im EMAC-SWIFT um etwa 10% höher als in der Klimatologie nach FL95. In der Südhemisphäre beträgt der Unterschied am Pol bei 30 hPa etwa 50%. Geringere Ozonwerte als bei FL95 treten in der Südhemisphäre unterhalb von 50 hPa in den Monaten Mai bis September auf, mit einem maximalen Unterschied im Mischungsverhältnis von -20% im August.

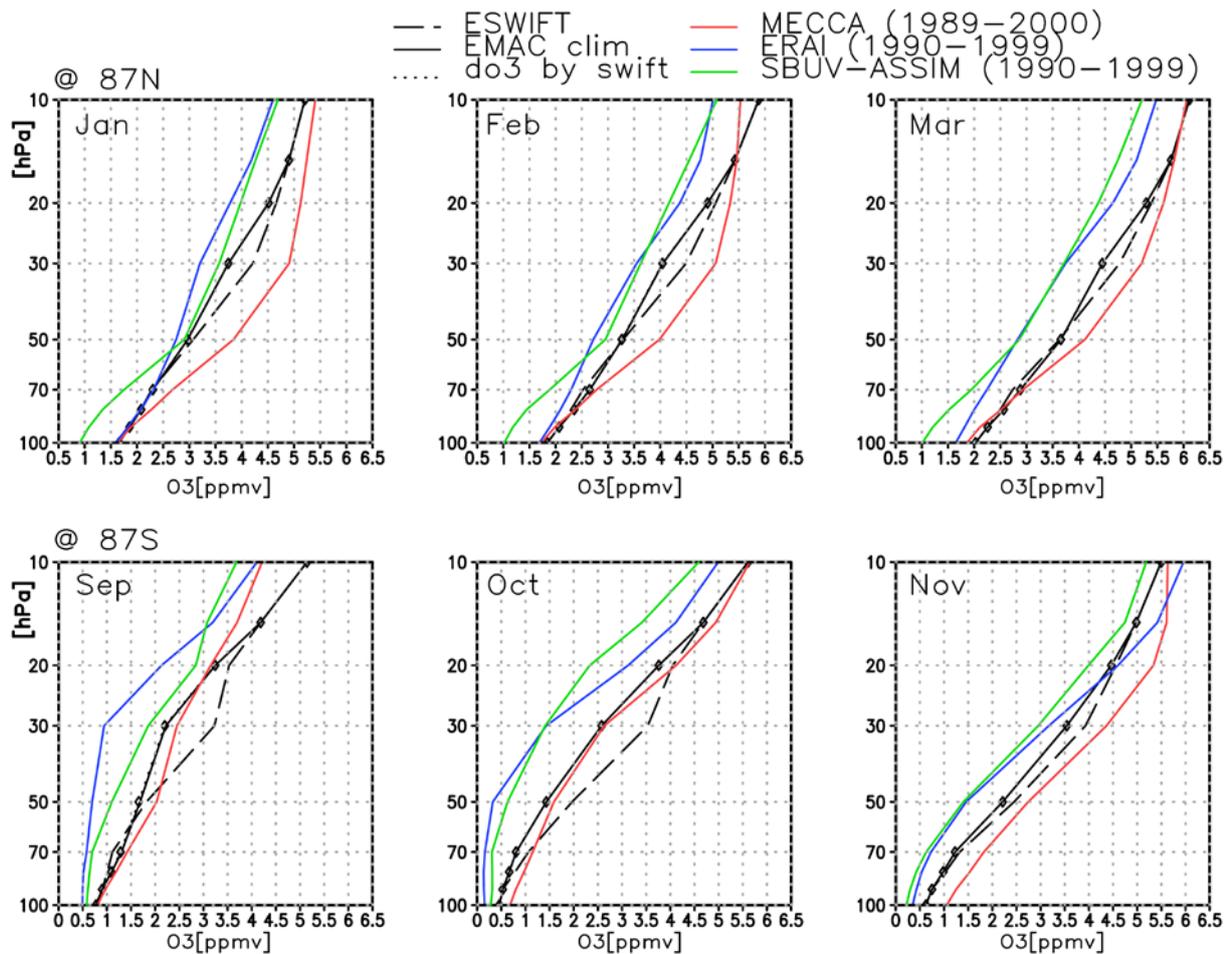


Abbildung 5: Langjähriges Mittel der Ozonprofile für Januar, Februar und März im zonalen Mittel bei 87°N (oben) und für September, Oktober und November bei 87°S (unten). Schwarze durchgezogene Linie: Klimatologie nach FL95. Schwarze gestrichelte Linie: Simulation mit EMAC mit SWIFT-Chemie. Rote Linie: Simulation mit EMAC mit komplexer Chemie. Blaue Linie: ERA-Interim im Zeitraum von 1990 bis 1999. Grüne Linie: SBUV-ASSIM.

Ein Vergleich der monatsgemittelten Profile von Ozon in der EMAC-SWIFT-Simulation mit anderen Datensätzen wird in Abb. 5 gezeigt. Man erkennt, dass im langjährigen Mittel das Ozonmischungsverhältnis bei der EMAC-SWIFT-Simulation in den oberen SWIFT-Schichten größer als die FL95-Klimatologie und in den unteren Leveln eher geringer als die Klimatologie ausfällt.

Abbildung 6 zeigt das langjährige monatliche Mittel von Ozon für EMAC-SWIFT und verschiedene Klimatologien bei 87°N in 70 hPa. Im Nordfrühling weist EMAC-SWIFT geringere Werte auf als die zugrunde liegende Klimatologie von FL95. Im Südwinter werden von EMAC-SWIFT geringere Ozonwerte simuliert als in der Klimatologie, was vermutlich durch den Transport verursacht wird. Im Südfrühling steigen die Ozonwerte bei 70 hPa dann über die Werte der Klimatologie von FL95.

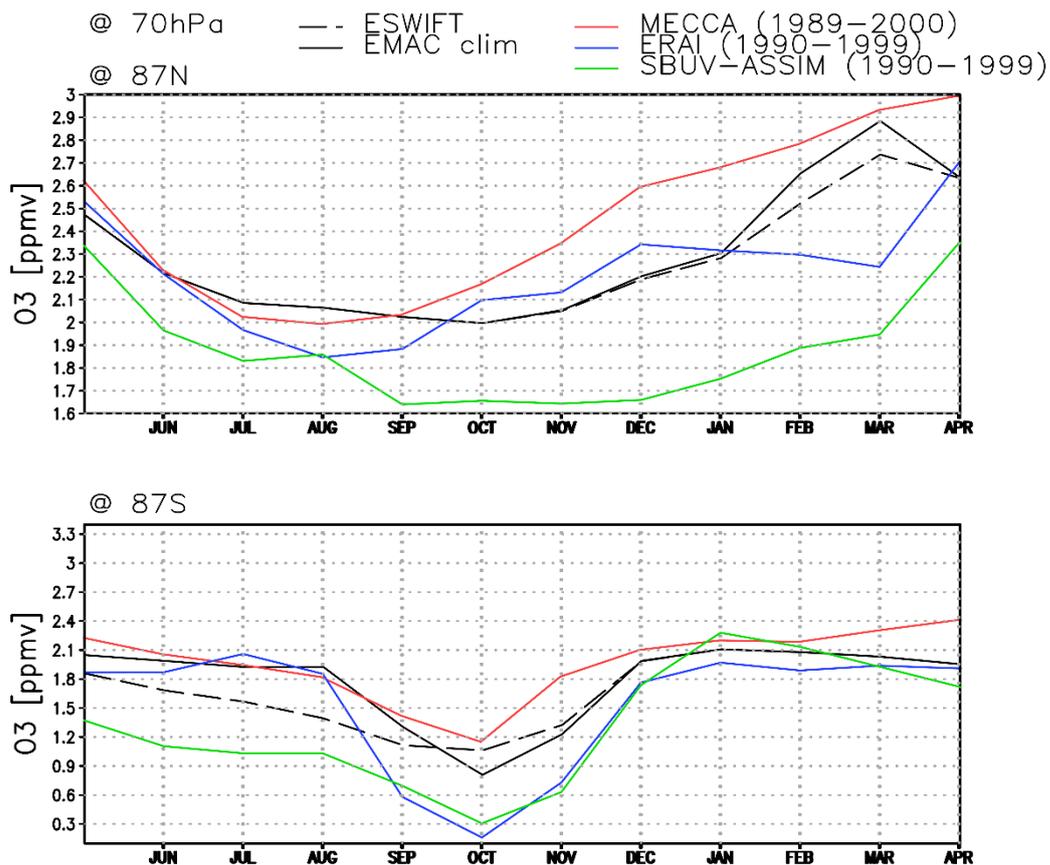


Abbildung 6: Langjähriges Mittel von Ozon [ppmv] in 70 hPa im Zonalmittel bei 87°N (oben) und 87°S (unten) für die Simulation mit EMAC-SWIFT (schwarze gestrichelte Linie), für die Klimatologie nach Fortuin und Langematz (1995, schwarze durchgezogene Linie), Simulation mit EMAC mit komplexer Chemie (rote Linie), ERA-INTERIM (blaue Linie) und SBUV-ASSIM (grüne Linie).

Die interannuale Variabilität von EMAC-SWIFT wird anhand des Totalozons für alle Oktober der Simulation deutlich (siehe Abbildung 7). In allen Jahren bildet sich ein Totalozonminimum im südhemisphärischen Polarwirbel aus. Der heterogene Ozonabbau in SWIFT ist allerdings schwächer ausgeprägt als in Totalozon-Beobachtungssätzen, was konsistent mit dem zur geringen Ozonabbau in 70 hPa ist (siehe Abb. 6, unten) ist. Die Gründe hierfür werden in weiteren Analysen in enger Zusammenarbeit mit Partner AWI im Rahmen von MiKlip II untersucht und in die Weiterentwicklung von EMAC-SWIFT einfließen.

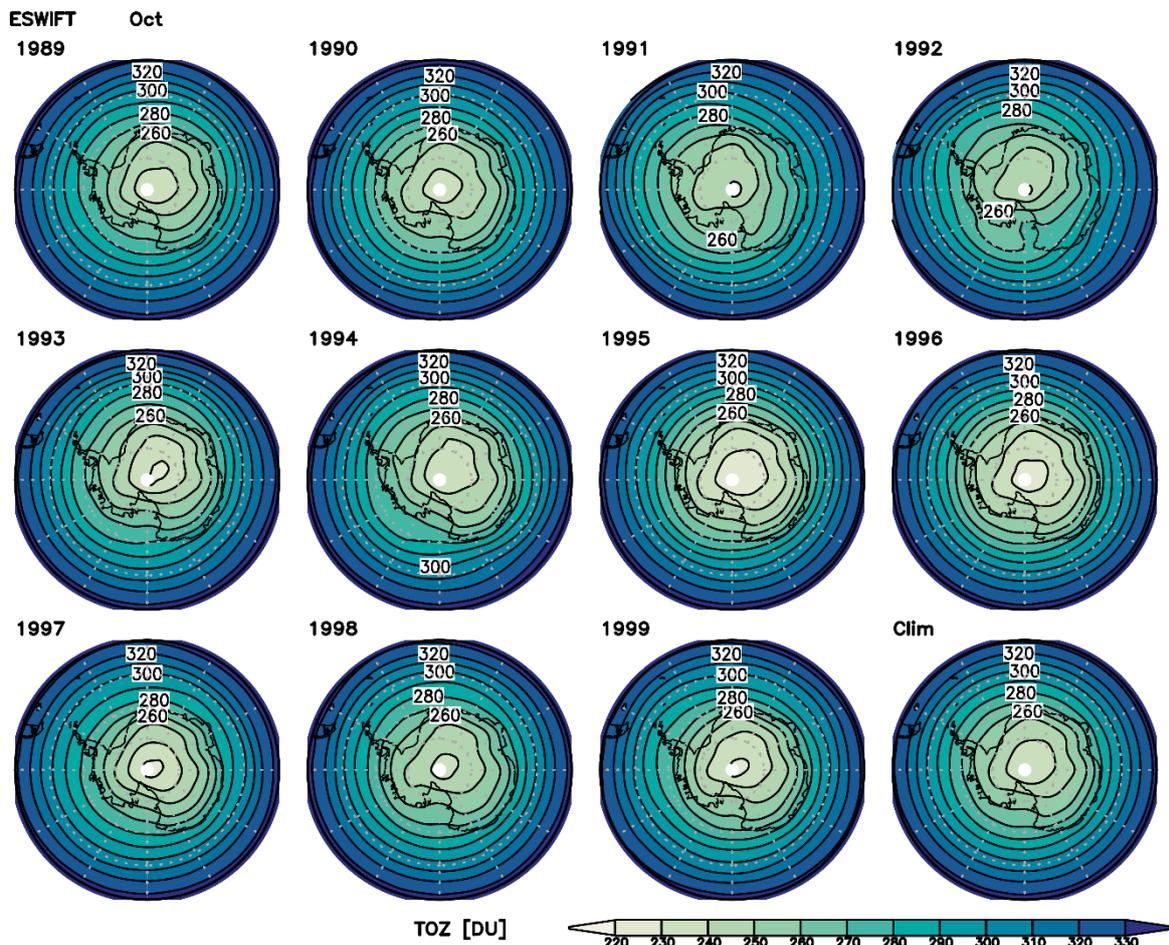


Abbildung 7: Totalozon [DU] für die Simulation mit EMAC-SWIFT für die Oktober von 1989 bis 1999 und für das Mittel über alle Oktober in diesem Zeitraum (unten rechts).

Beurteilung und Bedeutung von Ozon-Klima-Wechselwirkungen für dekadische Vorhersagen (WP5, AWI und FUB)

In Workpackage 5 war geplant, das SWIFT Modul in das Miklip Prototyp und Synthese Modell zu implementieren. WP 5 und Milestone M5 mussten jedoch aufgrund einer Entscheidung der Projektkoordination, die in Modul B entwickelten Module nicht in das MiKlip-Modellsystem zu integrieren, entfallen.

II.2. Zahlenmäßiger Nachweis

Personalkosten:

Die Personalkosten sind im Verwendungsnachweis aufgeführt.

Reisekosten:

Die Reisekosten sind im Verwendungsnachweis aufgeführt.

II.3. Notwendigkeit und Angemessenheit

Die geleistete Entwicklung der polaren und extrapolaren schnellen Ozonmodelle und die Implementation in das EMAC-Modell waren notwendig, um das Projektziel der Einführung einer interaktiven Ozonschicht in Klimamodellen und der Berücksichtigung von Wechselwirkungen zwischen Klima und Ozon zu erreichen. Aufgrund der komplexen Entwicklung des Modells und der aufwändigen Validierung war die Beschäftigung eines wissenschaftlichen Mitarbeiters und eines Doktoranden bei Partner AWI sowie einer Doktorandin bei Partner FUB Voraussetzung zum Erreichen der Ziele. Ohne die Zuwendung des BMBF hätten die genannten Arbeiten in dieser Form nicht geleistet werden können.

II.4. Nutzen und Verwertungsplan

Die Anwendung von EMAC-SWIFT im Vergleich zur Verwendung von komplexer Chemie bedeutet eine erhebliche Beschleunigung von Modellsimulationen mit interaktiver Chemie. Somit können anstelle von nur einer Modellsimulation mit der gleichen Rechenzeit viele Ensemble-Simulationen durchgeführt werden, wodurch eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Eintreffens einer Klimavorhersage getroffen werden kann.

Im Rahmen von MiKlip II soll ein Ozondatensatz entwickelt werden, der für die dekadische Vorhersage anwendbar ist.

II.5. Fortschritte bei anderen Stellen

Soweit uns bekannt, hat es während der Projektlaufzeit keine wesentlichen Fortschritte bei der Parametrisierung des stratosphärischen Ozons in Klimamodellen bei anderen Stellen gegeben.

II.6. Veröffentlichungen

Artikel:

M. Rex, S. Kremser, P. Huck, G. Bodeker, I. Wohltmann, M. L. Santee and P. Bernath, Technical note: SWIFT – a fast semi-empirical model for polar stratospheric ozone loss, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 6545-6555, 2014.

D. Kreyling, Doktorarbeit, Thema: Entwicklung und Anwendung des extrapolaren Teils des SWIFT-Modells, Veröffentlichung voraussichtlich Mitte 2016

J. Scheffler, Doktorarbeit, Thema: Untersuchung der Rolle der Ozon-Klimawechselwirkungen für die dekadische und langfristige Klimavorhersage mithilfe des Klima-Chemie-Modells EMAC mit schneller stratosphärischer Ozonchemie, Veröffentlichung voraussichtlich Ende 2016

I. Wohltmann et al., Update of the SWIFT model for polar stratospheric ozone loss, in preparation, *Atmos. Chem. Phys.*

I. Wohltmann et al., Quantitative importance of the reactions involved in heterogenous polar ozone depletion, in preparation, *Atmos. Chem. Phys.*

Konferenzbeiträge:

J. Scheffler, U. Langematz, M. Rex, I. Wohltmann, D. Kreyling, 2014: ESWIFT - A submodel for fast stratospheric ozone chemistry, Vortrag, 4th EMAC Symposium, Berlin.

J. Scheffler, U. Langematz, M. Rex, I. Wohltmann, D. Kreyling, 2015: Status of ESWIFT - A submodel for fast stratospheric ozone chemistry, Vortrag, 5th EMAC Symposium, Jülich.

D. Kreyling et al., 2015: Semi-empirical and numerically efficient stratospheric ozone chemistry for global climate models, EGU General Assembly, Wien und StratoClim Annual Meeting, Budapest.

J. Scheffler, I. Wohltmann, D. Kreyling, T. Orgis, U. Langematz, M. Rex, 2015: Fast stratospheric chemistry for climate models, Poster, IUGG 2015, Prag.

I. Wohltmann et al., 2015: Fast stratospheric ozone chemistry for climate models: The polar SWIFT model, StratoClim Annual Meeting, Budapest.

Referenzen:

Cariolle, D., and H. Teyssedre (2007), A revised linear ozone photochemistry parameterization for use in transport and general circulation models: multi-annual simulations, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(9), 2183–2196.

Fortuin, J. P., and U. Langematz (1995), Update on the global ozone climatology and on concurrent ozone and temperature trends, *Proc. SPIE*, 2311, 207–216, doi:10.1117/12.198578.

Jöckel, P., H. Tost, A. Pozzer, C. Brühl, J. Buchholz, L. Ganzeveld, P. Hoor, A. Kerkweg, M. G. Lawrence, R. Sander, B. Steil, G. Stiller, M. Tanarhte, D. Taraborrelli, J. van Aardenne, and J. Lelieveld (2006), The atmospheric chemistry general circulation model ECHAM5/MESy1: consistent simulation of ozone from the surface to the mesosphere, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6, 5067–5104, doi:10.5194/acp-6-5067-2006.

Lait, L. R. (1994), An Alternative Form for Potential Vorticity., *Journal of Atmospheric Sciences*, 51, 1754–1759, doi:10.1175/1520-0469(1994)051<1754:AAFFPV2.0.CO>2.

Lin, S., and R. Rood (1996), Multidimensional flux-form semi-Lagrangian transport schemes, *MONTHLY WEATHER REVIEW*, 124(9), 2046–2070, doi:{10.1175/1520-0493(1996)124<2046:MFFSLT 2.0.CO>2}.

McLinden, C. A., S. C. Olsen, B. Hannegan, O. Wild, M. J. Prather, and J. Sundet (2000), Stratospheric ozone in 3-D models: A simple chemistry and the cross-tropopause flux, *Journal of Geophysical Research*, 105, 14,653, doi:10.1029/2000JD900124.

Rex, M., S. Kremser, P. Huck, G. Bodeker, I. Wohltmann, M. L. Santee, and P. Bernath (2014), Technical Note: SWIFT – a fast semi-empirical model for polar stratospheric ozone loss, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 14, 6545–6555, doi:10.5194/acp-14-6545-2014.

Thompson, D. W. J., and S. Solomon (2002), Interpretation of Recent Southern Hemisphere Climate Change, *Science*, 296, 895–899, doi:10.1126/science.1069270.