

# Kapitel 8

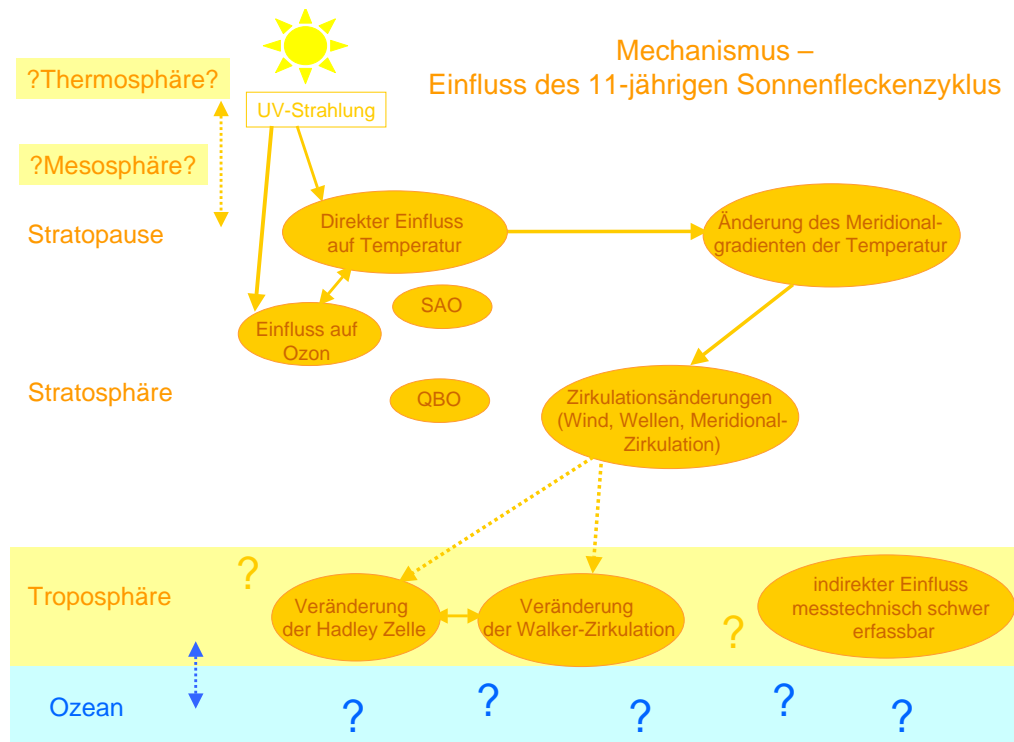
## Zusammenfassung

In dieser Arbeit ist es anhand von systematischen Studien mit dem FUB-CMAM gelungen, den Einfluss von 11-jährigen solaren UV-Strahlungsänderungen auf die Atmosphäre zu zeigen. Außerdem konnte der Mechanismus für die Übertragung des Sonnensignales, wie er bisher verstanden und aus Beobachtungen abgeleitet wurde, erstmals mit einem GCM nachvollzogen werden. Es existiert also ein physikalischer Mechanismus, mit dem der Einfluss der Sonnenvariabilität und die Übertragung des Sonnensignales erklärt werden können. Die wichtigsten Ergebnisse sollen hier noch einmal zusammengefasst werden (vgl. auch Abb. 8.1).

Zuerst wurde die Parametrisierung der kurzwelligen Strahlung im FUB-CMAM verfeinert, die eine entscheidende Verbesserung im Gegensatz zu in anderen Modellen verwendeten Strahlungsparametrisierungen darstellt. Die Repräsentation von kurzwelligen Strahlungsflüssen ist für das FUB-CMAM jetzt sehr hoch aufgelöst. Eventuelle Defizite der Simulationen sind sicherlich in erster Linie in der Repräsentation von dynamischen Prozessen zu suchen.

In einem nächsten Schritt wurden mit dieser erweiterten Modellversion erste Experimente zum Einfluss der 11-jährig variierenden solaren UV-Strahlung innerhalb des EU-Projektes SOLICE durchgeführt und im Rahmen des GRIPS-Modellvergleiches mit den Ergebnissen von vier anderen Klimamodellen verglichen, die mit den gleichen Strahlungs- und Ozonänderungsfeldern integriert wurden (Matthes et al., 2003). Dies ermöglichte einen besseren qualitativen und quantitativen Vergleich der zu diesem Zeitpunkt existierenden Sonnen-Modellexperimente. Es stellte sich heraus, dass die Modelle sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern und keines der Modelle in der Lage ist, die beobachtete Modulation des Polarnachtjets oder der mittleren meridionalen Restzirkulation zu reproduzieren. Die Ergebnisse von einem teilnehmenden Klimamodell erlaubten zusätzlich die Sensitivität bezüglich des vorgegebenen Ozonänderungsfeldes zu untersuchen - hier ergaben sich zum Teil völlig entgegengesetzte Resultate.

Die unterschiedlichen Ergebnisse der Modelle wurden zum einen auf die unterschiedlichen verwendeten Strahlungsschemata, zum anderen aber auf die unterschiedliche modellinterne Variabilität zurückgeführt. Es stellte sich heraus, dass insbesondere die im Vergleich zu Beobachtungen unrealistischen Modellklimatologien das Auftreten eines Sonnensignales in den Modellen verhindern. Eine Verbesserung der Modellklimatologie könnte also zu einer besseren Repräsentation des Sonnensignales in den Modellen führen (Matthes et al., 2003; Kodera et al., 2003). In diesen Modellstudien fehlten insbesondere die tropischen Windschwingungen, die QBO und die SAO.



**Abbildung 8.1:** Angepasste und erweiterte Abb. 2.15.

Die Ergebnisse des GRIPS-Vergleiches wurden dafür genutzt, systematische Verbesserungen der äquatorialen Windklimatologie in das FUB-CMAM einzubauen. Es zeigte sich, dass es nicht ausreicht, eine QBO nur in der unteren Stratosphäre zu implementieren, sondern dass ein realistisches äquatoriales Windprofil über die gesamte Höhe der Stratosphäre mit einer QBO-Phase in der unteren Stratosphäre, einer Scherzone darüber und einer SAO in der oberen Stratosphäre entscheidend ist. Damit konnten die Untersuchungen eines mechanistischen Modelles von Gray et al. (2001a) erstmals mit einem GCM bestätigt werden. Nur durch die Verbesserung der äquatorialen Windstruktur konnte die erste realistische Simulation des beobachteten stratosphärischen Sonnensignales im nordhemisphärischen Winter in einem GCM überhaupt erreicht werden (Matthes et al., 2004). Mit diesen Experimenten konnten folgende Punkte des Einflusses der Sonnenvariabilität auf das Klima (Abb. 8.1) sowie zur Übertragung des Signales gezeigt werden:

- Ein direkter Einfluss von Strahlungs- **und** Ozonänderungen in der oberen Stratosphäre wird vom Modell simuliert und bestätigt theoretisch die aus Beobachtungen und anderen Modellstudien abgeleiteten Annahmen. Die stärksten positiven Temperaturunterschiede zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum treten im zonalen Mittel mit 1,2 K in der tropischen und subtropischen Stratopausenregion (1 hPa/48 km) auf und reichen bis in die Troposphäre. Die stratosphärischen Anomalien sind abgesehen von den hohen Breiten statistisch signifikant.
- Die Berücksichtigung von Strahlungs- **und** Ozonänderungen ist wichtig, da beide einen gleich starken Anteil an der Erhöhung der kurzwelligen Erwärmungsrate haben.

- Der direkte (Strahlungs-) Effekt in der oberen Stratosphäre führt zu einer Änderung des meridionalen Temperaturgradienten und zu einem subtropischen Westwind-Initialsignal.
- Die Wechselwirkungen zwischen den Wellen und der Grundströmung führen zu einer Übertragung der direkten Signale aus der oberen Stratosphäre in die untere Stratosphäre und haben dort indirekte Zirkulationsänderungen zur Folge:
  - Das Westwind-Initialsignal wandert in die hohen Breiten und führt dort zu einer Modulation des Polarnachtstrahlstromes. Dies funktioniert im Modell besonders gut im nordhemisphärischen Winter. Im Sonnenfleckensmaximum ist der stratosphärische Polarnachtstrahlstrom im Mittel drei Monate lang bis zu mehr als 6 m/s stärker als im Sonnenfleckensminimum. Im späteren Verlauf des Winters kommt es im Mittel zu einer Abschwächung des Polarnachtstrahlstromes von mehr als 10 m/s.
  - Durch die Westwindanomalie kommt es zu einer positiven Wechselwirkung zwischen dem zonalen Wind und den planetarischen Wellen, die dazu führt, dass das Signal in die unteren Atmosphärenschichten übertragen wird.
  - Es kommt sowohl zu einer signifikanten Änderung der Wellenausbreitungsbedingungen in der Stratosphäre als auch zu einer Änderung der Wellenausbreitung aus der Troposphäre.
  - Durch die Modulation der planetarischen Wellenaktivität findet auch eine Änderung der wellengetriebenen mittleren meridionalen Restzirkulation statt. Die Modulation des extratropischen Wellenantriebes steht unter anderem mit tropischen Temperaturdifferenzen in der Stratosphäre im Zusammenhang.
- Die Phase der QBO bestimmt im Modell nur das zeitliche Auftreten des Sonnensignales im nordhemisphärischen Winter und bestätigt die aus Beobachtungsdaten vermuteten Zusammenhänge.
- Das Modell reproduziert die in Beobachtungen gefundenen Zirkulationsverhältnisse bei bestimmten QBO- und Sonnenfleckenzklus-Phasen im nordhemisphärischen Winter: warme, gestörte Winter treten bevorzugt unter Sonnenfleckensmaximum- und QBO-West-Bedingungen sowie Sonnenfleckensminimum- und QBO-Ost-Bedingungen auf; kalte, ungestörte Winter findet man hingegen unter Sonnenfleckensminimum- und QBO-West- sowie unter Sonnenfleckensmaximum- und QBO-Ost-Bedingungen.
- Die SAO ist für die Simulation eines Sonnensignales im Modell entscheidend. Sie wird daher allgemein für realistischere Simulationen in den Modellen benötigt.
- Die indirekten Effekte in der Stratosphäre erreichen nicht zu vernachlässigende Größenordnungen und wirken sich bis in die Troposphäre hinein aus. Sie sollten daher bei zukünftigen Klimaabschätzungen genau wie die direkten Effekte im nächsten IPCC-Bericht berücksichtigt werden.
- Signifikante troposphärische Zirkulationsänderungen treten in etwa zwei Monate nach den stärksten Änderungen in der oberen Stratosphäre auf.

In Abb. 8.1 sind die erzielten Ergebnisse dieser Arbeit noch einmal dargestellt. Mit den hier vorgestellten Experimenten gelang es, die Wichtigkeit der tropischen Windschwingungen, der QBO und der SAO, für eine realistischere Repräsentation des Sonnensignales zu zeigen, welche in Abb. 2.15 noch mit Fragezeichen behaftet war. Auch die Übertragung des Signales in

die Troposphäre und die Beeinflussung von troposphärischen Zirkulationszellen, wie Hadley- und Walker-Zirkulation konnte qualitativ gezeigt werden. Für eine vollständige Entfernung der Fragezeichen in der Troposphäre werden allerdings noch mehr Modell- und Beobachtungsstudien benötigt. Die durch solare Einstrahlungsänderungen (und Vulkanaktivität) hervorgerufene natürliche Variabilität der Stratosphäre ist auch deshalb bedeutend, weil sie der anthropogen verursachten Abkühlung der Stratosphäre entgegenwirkt.

In den Ergebnisskapiteln sind bereits die Probleme der Simulationen aufgezeigt worden, die hier noch einmal kurz zusammengefasst werden sollen.

- Auf der Südhemisphäre existiert aufgrund der im Vergleich zu Beobachtungen unrealistischen Klimatologie ein schwaches Sonnensignal sowohl im Südwinter als auch im Südsommer.
- Das schwache Signal im nordhemisphärischen Sommer wird ebenfalls auf den starken südhemisphärischen Polarnachtstrahlstrom zurückgeführt, der eine Modulation der Meridionalzirkulation und damit auch die Übertragung des Signales auf die Sommerhemisphäre verhindert.

Für die Unterschätzung der Signale besonders in niedrigen Breiten kommen verschiedene Möglichkeiten in Betracht, die mit der Struktur der Modellexperimente bzw. des verwendeten Modelles zusammenhängen:

- Die Modellvariabilität ist grundsätzlich im Vergleich zu Beobachtungen zu sehr auf die hohen Breiten konzentriert, wodurch die Variabilität in den niedrigen Breiten, z. B. im Bereich des beobachteten stratosphärischen Subtropenstrahlstromes reduziert ist. Durch die Hinzunahme einer Schwerewellenparametrisierung kann die Klimatologie verbessert werden (z. B. McLandress, 1998).
- Die Anpassung des zonal gemittelten zonalen Windes an konstante äquatoriale Windprofile führt zu einer verringerten tropischen Variabilität und damit zu einer Maskierung tropischer Signale. Idealerweise sollte sich die QBO im Modell selbst einstellen. Dazu benötigt man eine Schwerewellenparametrisierung, eine ausreichende räumliche Auflösung sowie eine realistische Simulation tropischer Konvektion (z. B. Scaife et al., 2000a; Giorgetta et al., 2002).
- Die hier benutzten Eingangsdaten (Strahlungs- und Ozonänderungen) sind mit Unsicherheiten behaftet. Bei der Bestimmung genauerer Eingangsdaten für zukünftige Klimamodellstudien und auch bei dem aus Beobachtungen abgeleiteten Sonnensignal besteht noch großer Forschungsbedarf.

Nicht auszuschließen ist, dass im Modell noch weitere Prozesse fehlen, welche zu einer Verbesserung der Signale beitragen würden. Faktoren, die hierfür in Frage kommen sind:

- die fehlende Wechselwirkung zwischen Strahlung, Dynamik **und** Chemie. Die Ozonkonzentration kann sich aufgrund der geänderten Strahlung und geänderter dynamischer Felder nicht anpassen, sie wird klimatologisch fest vorgegeben. Gerade in der tropischen unteren und mittleren Stratosphäre stellt die Variabilität von Ozon aber einen wichtigen Faktor für die natürliche Variabilität der Stratosphäre dar.

- die fehlende Wechselwirkung zwischen Atmosphäre und Ozean. Die festen Meeresoberflächentemperaturen führen zu einer Verringerung der Signale in der Troposphäre und lassen vor allen Dingen keine Simulation von Variationen der Solarstrahlung im sichtbaren Bereich zu.
- die fehlende Berücksichtigung der höheren Atmosphärenschichten (Mesosphäre und Thermosphäre), welche von der variierenden solaren Einstrahlung ebenfalls stark moduliert werden.
- die fehlende Berücksichtigung einer zeitlich variierenden QBO und eines zeitlich variierenden 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus. Dadurch kann die Modulation der Länge und Amplitude der QBO-Phasen (z. B. Salby und Callaghan, 2000; Labitzke, 2003) nicht überprüft werden.

Bisher existieren zu den genannten Punkten entweder überhaupt keine Modellstudien oder Studien mit einem interaktiven Chemiemodul, die keine vergleichbaren Ergebnisse erzielen. Erste Ergebnisse mit einer sich selbstständig einstellenden QBO im Unified Modell sind vielversprechend und bestätigen die hier gezeigten Resultate für QBO-Ost- und -West-Bedingungen (Michael Palmer, persönliche Mitteilung, 2003). Die Solarstrahlung wurde allerdings um einen unrealistisch hohen Wert ( $7,5 \text{ W/m}^2$ ) verringert, das Ozon nicht interaktiv berechnet und die Experimente nicht mit einer zeitlich variierenden Sonneneinstrahlung, sondern unter konstanten Bedingungen integriert.

In Abb. 8.1 sind zusätzlich zu den in dieser Arbeit erzielten Verbesserungen auch zukünftige zu berücksichtigende Faktoren eingezeichnet worden. Der Ozean spielt für die realistischere Simulation des troposphärischen Signales eine entscheidende Rolle. Die Wechselwirkung zwischen Ozean und Atmosphäre (blau gestrichelter Pfeil in Abb. 8.1) sowie ein mögliches Sonnensignal im Ozean müssen sowohl in Beobachtungs- als auch Modellstudien weiter untersucht werden. Auch die Rolle der Hochatmosphäre, die zuerst von der Solarstrahlung erreicht wird und durch die Absorption von kurzwelliger UV-Strahlung für den thermischen und chemischen Haushalt der Atmosphäre wichtig ist, muss weiter studiert werden. Ein besseres Verständnis der Kopplung zwischen den einzelnen atmosphärischen Schichten (orange gestrichelter Pfeil in Abb. 8.1) ist für ein vollständiges Verständnis von solaren Einstrahlungsvariationen und deren Auswirkungen bedeutend.

Diese Arbeit zeigt auch, wie wichtig systematische Prozessstudien mit Modellen sind. Integriert man ein zu komplexes Modell mit einer Vielzahl von enthaltenen Wechselwirkungen, so wird es nahezu unmöglich, die zugrunde liegenden Prozesse getrennt zu betrachten und nachzuvollziehen, da sich ihre Signaturen überlagern bzw. miteinander in Wechselwirkung treten. Es macht keinen Sinn, in ein Modell möglichst viele realistische Prozesse auf einmal zu implementieren. Dies sollte vielmehr schrittweise geschehen, in dem man nach und nach das Modell mit einer Änderung noch einmal integriert. Auch mit vereinfachten Modellstudien, wie der hier vorgestellten, kann man Mechanismen verstehen und nachvollziehen.

## 8.1 Ausblick

Neben der Kontinuität von existierenden Beobachtungsreihen, muss eine ständige Validierung und Verbesserung der Modelle erfolgen. Wichtige Punkte hierbei sind sowohl die Verbesserung der Modellklimatologie als auch die systematische Hinzunahme verschiedener Modellerweiterungen und -prozesse.

Zur Fortführung der hier vorgestellten Arbeiten wurde ein Projektantrag für ein „Marie Curie Outgoing International Fellowship“<sup>1)</sup> im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union im Mai dieses Jahres eingereicht. Die in dem Projektantrag aufgeführten Ziele knüpfen direkt an die in der Zusammenfassung aufgezählten offenen Punkte an. In dem Projekt soll ein am National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado, USA) neu entwickeltes Modell für die Studien zum Sonneneinfluss genutzt werden. Dieses „Whole Atmosphere Chemistry Climate Model (WACCM)“ enthält die Atmosphäre vom Erdboden bis in die Thermosphäre (140 km) und ist entwickelt worden, um die Wechselwirkungen zwischen Strahlung, Dynamik **und** Chemie zu untersuchen. Die geplanten Modellstudien haben folgende Ziele:

- Besseres Verständnis der chemisch-dynamischen Antwort der Atmosphäre auf 11-jährige Variationen des Sonnenfleckenzyklus, um die Diskrepanz zwischen existierenden Beobachtungs- und Modellstudien zu reduzieren.
- Besseres Verständnis für den Einfluss des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus auf die Mesosphäre und Thermosphäre. Dazu gibt es bisher erste Modellstudien am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg mit dem „HAMBURG Model of the Neutral and Ionized Atmosphere (HAMMONIA)“ (Hauke Schmidt, persönliche Mitteilung, 2003).
- Besseres Verständnis für die dynamische Antwort auf den Sonnenfleckenzyklus und die Kopplung verschiedener atmosphärischer Schichten.  
In dieser Arbeit ist nur kurz auf die wechselseitige Beeinflussung zwischen Stratosphäre und Troposphäre eingegangen worden. Auch die anderen atmosphärischen Schichten (Mesosphäre, Thermosphäre) sind miteinander gekoppelt und das Verständnis ihrer gegenseitigen Beeinflussung ist aufgrund von fehlenden Beobachtungen noch unzureichend.
- Beteiligung an internationalen Modell-Vergleichsstudien wie GRIPS, um die Probleme der Modelle zu analysieren und gezieltere zukünftige Modellintegrationen durchführen zu können.
- Transfer des WACCM-Modelles an die Freie Universität Berlin, um die begonnenen Studien fortzuführen und das Modell für neue Projektanträge nutzen zu können.

Das WACCM-Modell gehört zu den sogenannten „Earth System Models (EMs)“, welche eine Kopplung zwischen einem (Hoch-) Atmosphärenmodell mit einem Chemie- und Ozeanmodul sowie weiteren Modulen anstreben. Dieses Modell bietet daher die einmalige Chance, den Einfluss von Variationen der Solarstrahlung, wie er in dieser Arbeit für die Stratosphäre und Troposphäre vorgestellt wurde, nach und nach von der Thermosphäre bis in den Ozean hinein zu untersuchen.

---

<sup>1)</sup>Zwei Drittel der Zeit des Stipendiums werden an einer ausländischen Gastinstitution verbracht, ein Drittel der Zeit an einer im Heimatland ansässigen Institution.