

# Kapitel 8

## Zusammenfassung

Der Einfluss der Dynamik auf die seit 1979 beobachtete Abnahme des Totalozons in den mittleren Breiten macht sich durch eine hohe saisonale und zwischenjährliche Schwankungsbreite der Ozonabnahme bemerkbar, die maximal während der Winter-Frühjahr Monate der Nordhemisphäre ist (Fioletov et al., 2002). Für die Ozonabnahme in den mittleren Breiten spielen Transportprozesse, die die Zufuhr polarer und tropischer Luftmassen in die mittleren Breiten verursachen, eine große Rolle.

Diese Transportprozesse in der Stratosphäre mit Hilfe des Berliner Zirkulationmodells zu untersuchen, war Ziel der vorliegenden Arbeit. Dafür wurde die horizontale Auflösung im Berliner Zirkulationsmodell erhöht und mit der nunmehr doppelt so hohen Auflösung eine Untersuchung von spezifischen Transportphänomenen und -prozessen durchgeführt. Um die Aussagen zu verifizieren wurde mit dem Modell eine Streamer-Klimatologie erstellt, die mit „Beobachtungen“ verglichen wurde.

Die Simulationen zum Vergleich der verschiedenen Modellauflösungen (T21/T42) bezogen sich schwerpunktmäßig auf die winterliche Stratosphäre. Die höhere horizontale Auflösung (T42) führte dabei einerseits zur Verstärkung der Extrema im Modell. Dadurch wurde das „Cold Pole Bias“ Problem beibehalten, was sich in einer kalten Winterstratosphäre mit zu starkem Westwindjet bemerkbar macht. Dieses Defizit ist auf die fehlende Simulation von Schwerewellen zurückzuführen. Die höhere Modellauflösung T42 führte jedoch andererseits auch zu deutlichen Verbesserungen der Modellergebnisse. So werden beispielsweise die Temperaturen an der Wintermesopause und die Wellenanregung in der Troposphäre realistischer dargestellt. Ebenso wird eine verstärkte Variabilität im T42-Modell erzielt, die realistisch im Vergleich zu Beobachtungen der 1990er Jahre ist. So wurden in der 10 Jahre umfassenden T42-Klimatologie zwei Major Midwinter Warmings simuliert, die beide eine „Welle 1 Erwärmung“ waren. Im Gegensatz dazu stellen sich im T21-Modell in der 30 Jahre umfassenden Klimatologie lediglich zwei Major Midwinter Warmings ein, die beide „Welle 2 Erwärmungen“ waren. Die im Modell (T42) simulierte Variabilität ist ausschließlich ein Produkt der modellintern produzierten Variabilität, die weder durch eine QBO, den 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus, die variierenden Meeresoberflächentemperaturen noch durch einen Vulkanausbruch moduliert wird.

Der Schwerpunkt der Arbeit lag auf der Untersuchung des Spurengastransports in der winterlichen Stratosphäre. Bei dem Vergleich der beiden Modellauflösungen wurden anhand einer Transportfallstudie die Auswirkungen von intensiven Stratosphärenerwärmungen auf den Spurengastransport untersucht. Nach einem Major Midwinter Warming, das entweder zu einer Teilung des Polarwirbels in zwei Zentren oder zu einer andauernden deutlichen Verschiebung des Polarwirbels vom Pol führt, kommt es zu starken Austauschprozessen von Polarwirbelluft und Luft mittlerer Breiten sowie zur irreversiblen Durchmischung der Spurengase in der *Surf Zone*. Dadurch kann der Beitrag plötzlicher Stratosphärenerwärmungen an der beobachteten Ozonabnahme in den mittleren Breiten groß sein, wie z.B. von Marchand et al. (2002) mit einem maximal 50%igen Anteil im Frühjahr 2000 (nach dem Final Warming) quantifiziert wurde. Wie hier im Fallbeispiel des Early Major Warmings im Dezember 2001 gezeigt wurde, kommt es nicht immer zu so einem starken Luftmassenaustausch. In diesem beobachteten Fallbeispiel handelt es sich um ein nur kurz andauerndes Major Warming.

Bei der Betrachtung spezifischer kleinräumiger Transportphänomene liegen wiederum die Vorteile im T42-Modell, das im Vergleich mit Beobachtungen realistischere Ergebnisse lieferte. Filamentartige Strukturen, die den beobachteten bzw. mit Konturadvektionssimulationen (Norton, 1994) analysierten Filamenten ähnlich sind, werden im T42-Modell erfolgreich simuliert. Der T42-Transport ist formhaltender und numerisch weniger diffusiv als der T21-Transport, in guter Übereinstimmung mit anderen Transportuntersuchungen (Methven und Hoskins, 1999). Als Konsequenz aus diesen Ergebnissen wurden die weiteren Transportuntersuchungen der Arbeit mit der T42-Modellauflösung durchgeführt.

In dieser Arbeit wurden spezifische Transportphänomene in der winterlichen Stratosphäre im Berliner T42-Modell untersucht. Ein neues Ergebnis der vorliegenden Arbeit stellt dabei die Einteilung der Phänomene in Tropische Streamer, Polarwirbel Streamer und Cat Eyes dar, die auf ihre charakteristischen Merkmale in einem ausgesuchten Winter des Berliner Modells untersucht und anhand von Beobachtungsdaten validiert wurden. Es stellte sich heraus, dass Tropische-Subtropische Streamer und Polarwirbel Streamer eine charakteristische Breite von 500–2.000 km, eine Länge von mehr als 20.000 km und eine Erstreckung in der Vertikalen von 10–20 km aufweisen. Sie bestehen etwa 1–3 Wochen lang und lösen sich dann innerhalb von 1–2 Wochen auf. Streamer sind also nicht zu verwechseln mit *Filamenten*, die als sehr schmale und kurze Strukturen beobachtet werden. Zwischen beiden gibt es jedoch einen engen Zusammenhang. So beschreibt ein Filament demnach auch das Endstadium einer *Streamerepisode*. Cat Eyes umfassen bis zu maximal 1/3 der Hemisphäre von 20–65° N. In Cat Eyes findet irreversible Durchmischung sowohl von polaren Luftmassen als auch von Luftmassen tropischen Ursprungs statt.

Tropische Streamer entstehen über Nordamerika und Asien und erreichen polwärts maximal 65° N. Während aktiver Perioden werden sie nordostwärts advehiert, um sich dort entweder in den umgebenden Luftmassen aufzulösen, oder in ein Cat Eye zu wickeln, um schließlich zu zerbrechen. Bei den Modellsimulationen fällt auf, dass ein charakteristischer Unterschied in den Größenordnungen zwischen den breiteren Atlantik-Streamern

und den schmalen aufgelösten Asien-Streamern besteht, was auch die Beobachtungen der ATLAS-3 Mission zeigten.

Ein Polarwirbel Streamer entsteht z.B. durch die Verstärkung bzw. nordwärtige Verlagerung des Aläutenhochs. In einem Modellbeispiel erreicht ein Polarwirbel Streamer mit Luftmassen des inneren Polarwirbelbereichs bei sehr weit südwärts gelegenen Polarwirbelrand ( $40^\circ$  N) sogar die Subtropen. Zu einem späteren Zeitpunkt der Simulation kommt es zu einer filamentartigen Extrusion des Polarwirbels, die dabei aber nur einen Luftmasseneintrag des Polarwirbelrandes in die Subtropen liefert. Luftmassenaustausch, der vom Inneren des Polarwirbels in die mittleren Breiten stattfindet, wurde bisher nicht beobachtet (WMO, 1999).

Die Prozessstudie eines Modellwinters hat gezeigt, dass es einen qualitativen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von Antizyklonen, der Verschiebung des Polarwirbels zu niedrigen Breiten und dem Auftreten von Streamern gibt. Die Entstehung von Tropischen Streamern zeigt eine hohe Korrelation zwischen stärkeren Südwinden und der Verschiebung des Polarwirbels zu niedrigeren Breiten. Extrusions-Strukturen, die hier in dieser Arbeit als Polarwirbel Streamer bezeichnet werden, sind einer Verstärkung und Drehung des Westwindes auf W-SW und der Entstehung und der polwärtigen Verschiebung des Aläutenhochs zuzuordnen. Cat Eyes wurden im Zusammenhang mit dem Auftreten von Hochdruckzellen simuliert. Die hier untersuchten Streamer bzw. Cat Eyes bleiben bestehen, so lange ein gleichmäßiger stetiger Grundstrom vorherrscht. Während einer sich zeitlich ändernden Dynamik des Polarwirbels lösen sich die Transportstrukturen wieder auf.

Um den Einfluss von Transportprozessen auf den beobachteten Ozontrend in den mittleren Breiten zu untersuchen wurde eine globale Streamer-Klimatologie für den Zeitraum Oktober bis Mai mit dem T42-Modell durchgeführt. Bisherige Klimatologien von Transportstrukturen konzentrierten sich auf Filament-Laminae Beobachtungen. Eine Klimatologie von Streamern ist bisher nur mit „Beobachtungsdaten“ von Langbein und Kouker (2001) durchgeführt worden.

In der hier vorliegenden Arbeit wurde eine Streamer-Klimatologie mit der Methode der zonalen Anomalie erstellt, die im Vergleich zu anderen Methoden das beste Ergebnis bei der Identifizierung von Streamern erbrachte.

Die Streamer-Klimatologie der Stratosphäre wurde erstmalig in eine Untersuchung von Tropischen-Subtropischen und Polarwirbel Streamern unterteilt. Die Analyse der Monate Oktober bis Mai ergab ein maximales Auftreten von Tropischen Streamern im Winter und Frühjahr in der mittleren bis oberen Stratosphäre. Im langjährigen Mittel treten die höchsten Frequenzen in den Subtropen der Nordhemisphäre auf, die maximal über dem Atlantik und Ostasien werden. Tropische Streamer haben dabei eine ca. vierfach höhere Frequenz als Polarwirbel Streamer. Daraus kann geschlossen werden, dass die Subtropische Barriere im T42-Modell durchlässiger als die Polarwirbel Barriere ist. Diese Charakteristika von Streamern stimmen gut mit Beobachtungen (WMO, 1999; Offerman et al., 1999; Manney et al., 2001; Langbein und Kouker, 2001) überein.

Interessant für die Ozonproblematik in der Stratosphäre ist vor allem die Betrachtung der unteren Stratosphäre, die den stärksten Ozonabbau in den hohen Breiten aufweist.

Hierfür wurden die Streamer-Klimatologien des T42-Modells einerseits und der Beobachtungen der 1990er Jahre andererseits verglichen. Der größte Unterschied zwischen den Klimatologien wurde dabei durch die Art der Methode zur Identifizierung von (Tropischen) Streamern verursacht. So wurde eine den Beobachtungen vergleichbare räumliche Streamerhäufigkeit im T42-Modell simuliert, wenn eine ähnliche Methode zur Identifizierung der Streamer verwendet wurde. Die für den Ozontrend in den mittleren Breiten relevanten Transportprozesse ergaben in der simulierten Streamer-Klimatologie der unteren Stratosphäre einen regionalen Austausch von maximal 10% (pro Dekade) tropischer Luftmassen in die mittleren Breiten. Demnach kann mit dem T42-Modell ein Anteil dynamischer Prozesse an dem beobachteten negativen Ozontrend in den mittleren Breiten durch den Eintrag tropischer Luftmassen erklärt werden, wie z.B. auch von Bojkov und Balis (2001) beobachtet wurde. Die Autoren analysierten für den Zeitraum 1957–2000 eine erhöhte Frequenz von subtropischen Injektionen in die mittlere Breiten in der UT/LS Region, von Oktober bis Dezember, mit einem zunehmenden Trend seit den 1980er und 1990er Jahren.

Wie sich bei der Untersuchung der mittleren Stratosphäre im Rahmen dieser Arbeit zeigte, fand gerade in dieser Schicht maximaler Luftmassenaustausch von Tropischen sowie Polarwirbel Streamern statt. So wurde im langjährigen Mittel im März maximal 50% Luftmassenaustausch tropischer Breiten in die mittleren Breiten über Asien simuliert. Die Bedeutung der mittleren Stratosphäre für den globalen Spurengashaushalt in den mittleren Breiten ist bisher kein Forschungsschwerpunkt (siehe neues WMO-Assessment: persönliche Mitteilungen, Shepherd, 2002) und sollte mehr Beachtung finden.

### **Ausblick**

Die Ergebnisse der T42-Modell-Klimatologie zeigten, dass für zukünftige (T42) Untersuchungen eine Parametrisierung von Schwerewellen sinnvoll wäre. Erste Erfahrungen mit der Parametrisierung von Schwerewellen wurden mit den gekoppelten Chemie-Atmosphärenläufen gesammelt. Da für die Ozonchemie die realistische Simulation der Temperatur notwendig ist, wurde die Parametrisierung von Schwerewellen in das Berliner Modell eingeführt.

Die zur Zeit in der Arbeitsgruppe durchgeführten Atmosphärenläufe mit gekoppelter Chemie wurden aus Rechenzeitkosten nur mit einer Modellauflösung von T21 realisiert. Für die Betrachtung klimatologischer globaler Änderungen des Spurengashaushalts ist der T21-Transport ausreichend. Bei der Betrachtung kleinräumiger und zeitlich abhängiger Transportprozesse, wie z.B. der Entwicklung und dem Zerbrechen von Streamern, sollte eine höhere horizontale Auflösung für die Modellsimulationen verwendet werden. Für die gekoppelten Chemie-Atmosphärenläufe wurde das semi-Lagrange'sche Transportschema in der vertikalen Achse modifiziert. Eine Validierung der Transportprozesse auch in der Vertikalen, wäre für die geplanten Gegenwarts- und Zukunfts-Szenarien von Wichtigkeit.