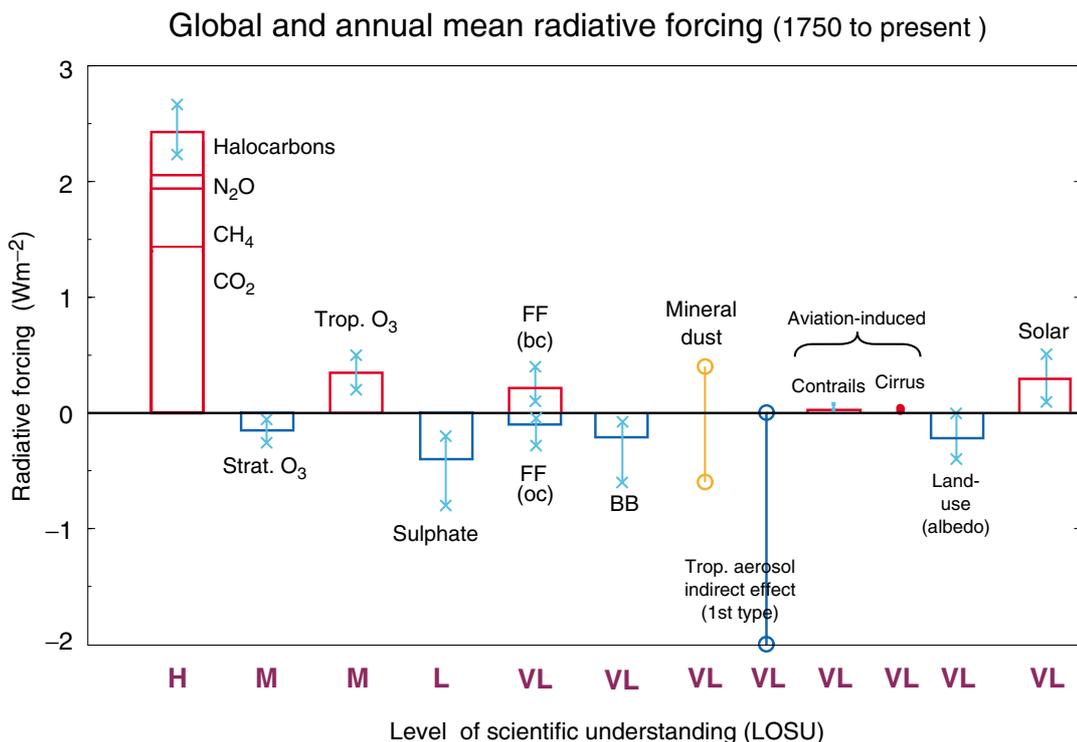


# Einleitung

Das Verständnis von natürlich und anthropogen bedingten Klimaänderungen ist nicht nur ein sehr komplexes, aktuelles wissenschaftliches Problem, sondern hat auch eine besondere gesellschaftliche Bedeutung. Um den anthropogen bedingten Anteil der beobachteten globalen Erwärmung abzuschätzen, zukünftige Klimaentwicklungen vorherzusagen und deren Genauigkeit zu steigern, ist es wichtig, die natürliche Variabilität der Atmosphäre zu verstehen. Da die Sonne die fundamentale Energiequelle unseres Klimasystems ist, stellen Variationen ihrer Einstrahlung eine potenzielle Quelle für natürliche Klimaänderungen dar. Während der Einfluss von anthropogenen Faktoren (Kohlenstoffdioxid, Methan, Distickstoffoxid (Lachgas), Fluorchlorkohlenwasserstoffen), auf das Klima mit großer Genauigkeit bestimmt werden kann (Abb. 0.1 ganz links), gibt es bei den natürlichen Faktoren (z. B. Solarstrahlung oder durch Vulkanausbrüche ausgestoßene Aerosolpartikel) sehr viel größere Verständnisprobleme (Abb. 0.1 ganz rechts) (IPCC, 2001; WMO, 2003). Ziel dieser Arbeit ist es, die Bedeutung der solaren Einstrahlungsvariationen für Klimaveränderungen zu untersuchen und deren Einfluss auf die Atmosphäre besser zu verstehen.



**Abbildung 0.1:** Jahresmittel des global gemittelten Strahlungsantriebes für verschiedene Faktoren für die Zeit von 1750 (vorindustriell) bis heute (2000) in  $W/m^2$  (FF(bc/oc): „Fossil Fuel Burning (black/organic carbon)“ und BB: „Biomass Burning“). Während die y-Achse die Wirkung der einzelnen Faktoren (positiv=Erwärmung, negativ=Abkühlung) angibt, ist auf der x-Achse das Niveau des wissenschaftlichen Verständnisses angegeben. Dieses nimmt von links nach rechts ab (H=High, VL=Very Low) (IPCC, 2001).

Dazu werden in dieser Arbeit die Variationen mit dem wohl bekanntesten Zyklus der Sonnenaktivität, dem 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus (Schwabe-Zyklus), untersucht, bei dem die prozentualen Schwankungen der totalen solaren Einstrahlung zwischen Sonnenfleckenmaximum und -minimum mit etwa 0,1% sehr gering sind. In dem für die Ozonbildung wichtigen ultravioletten (UV) Bereich können diese Intensitätsschwankungen jedoch bis zu 8% (um 200 nm) betragen (Lean et al., 1997) und haben einen nicht zu vernachlässigenden Effekt auf den Strahlungs- und Ozonhaushalt der Mittleren Atmosphäre (20-80 km Höhe) (z. B. Haigh, 1994). Diese Variationen sind stark wellenlängenabhängig und steigern sich mit kleineren Wellenlängen. Die von der Sonne kommende Strahlung wird in der Erdatmosphäre geschwächt, wodurch die Strahlung kleinerer Wellenlängen in den höheren Schichten der Erdatmosphäre herausgefiltert wird und die Erdoberfläche gar nicht erreicht. Die Stratosphäre spielt als eine sehr sensible Schicht zwischen der Troposphäre, in der sich das tägliche Wetter abspielt, und den höheren Atmosphärenschichten eine ganz besondere Rolle. In der Stratosphäre befinden sich 90% des atmosphärischen Ozons, welches die schädliche UV-Strahlung aus der ankommenden Solarstrahlung absorbiert und so verhindert, dass diese bis in die Troposphäre vordringt. Änderungen der Ozonkonzentrationen in der Stratosphäre, z. B. durch den Anstieg der Fluorchlorkohlenwasserstoffe, wirken sich also direkt auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre aus. Die Stratosphäre wird deshalb auch oft als „Frühwarnsystem“ für Klimaänderungen bezeichnet und muss bei der Abschätzung zukünftiger Klimaentwicklungen berücksichtigt werden.

Es sollte an dieser Stelle betont werden, dass der anthropogen bedingte Anstieg der Treibhausgase, der in dieser Größenordnung bisher in der Erdgeschichte noch nie beobachtet wurde (z. B. Petit et al., 1999), hauptverantwortlich für den globalen Anstieg der Erdoberflächentemperatur in den letzten 50 Jahren ist (IPCC, 2001). Den Temperaturanstieg der letzten 140 Jahre kann man allerdings nur erklären, wenn auch natürliche Variabilitätsfaktoren, wie z. B. die Sonne und Vulkanaktivität hinzugenommen werden (IPCC, 2001). Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Untersuchung der natürlichen Variabilität der Atmosphäre durch den 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus.

Untersuchungen zum Einfluss der Sonnenvariabilität auf das Wetter und Klima gibt es schon sehr lange (z. B. Herschel, 1801b). Ein bekanntes Beispiel ist das gleichzeitige Auftreten einer Phase sehr geringer Sonnenaktivität, des sogenannten Maunder Minimums, und einer sehr kalten Klimaphase im 17./18. Jahrhundert, der kleinen Eiszeit in Mitteleuropa (Eddy, 1976). Neben den zahlreichen Untersuchungen in der Troposphäre, die 11-jährige Signale in verschiedensten Klimaparametern und -archiven finden (z. B. Cooper et al., 2000; Reid, 2000; Cobb et al., 2001; Grootes, 2001; Kromer et al., 2001; Neff et al., 2001; Negendank und Arbeitsgruppe, 2001; Tourre et al., 2001; Hoffmann et al., 2002; Thompson et al., 2002; White und Tourre, 2003), gibt es mit der Verfügbarkeit stratosphärischer Daten seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY) 1957/58 auch Untersuchungen für diesen Höhenbereich.

Hohe Korrelationen zwischen der 11-jährig variierenden Sonneneinstrahlung und meteorologischen Parametern in der Stratosphäre (z. B. Labitzke, 1987; Labitzke und van Loon, 1988) legen eine Beeinflussung der Atmosphäre durch die Variationen der Solarstrahlung nahe. Eine besondere Rolle spielt dabei auch die Wechselwirkung mit der Quasi-Biennial Oscillation (QBO), einer beinahe zweijährigen Windschwingung in der äquatorialen unteren Stratosphäre, bei der sich West- und Ostwinde regelmäßig abwechseln, (z. B. Labitzke und van Loon, 1988; Salby und Callaghan, 2000; Labitzke, 2003) und die Wechselwirkung mit der Semi-Annual Oscillation (SAO), einer halbjährigen Schwingung des äquatorialen Windes in der oberen Stratosphäre (z. B. Gray et al., 2001a,b, 2003). Die tropischen Windschwingungen bestimmen die natürliche

Variabilität der Stratosphäre signifikant und beeinflussen insbesondere auch die Zirkulation der jeweiligen Winterhemisphäre (z. B. Baldwin et al., 2001). Die Wechselwirkungen zwischen der QBO und der Sonne sowie der Sonne und der SAO sind noch nicht vollständig verstanden, hier besteht also Forschungsbedarf. Aufgrund der zeitlichen und räumlichen Begrenztheit der verfügbaren Beobachtungsdaten für Sonne und Klima gab es immer wieder kritische Stimmen zum möglichen Einfluss der Sonnenvariabilität auf das Klima (z. B. Pittock, 1978). Erst die langsam wachsende Anzahl von global verfügbaren Beobachtungsdaten, die mit den ersten Satellitenmessungen in den 1960er Jahren begann, ließ die Akzeptanz solcher Studien in den letzten Jahren steigen.

Um die Diskrepanz der für statistische Untersuchungen zu kurzen Beobachtungszeitreihen zu umgehen, untersucht man die natürliche Variabilität der Atmosphäre und die anthropogen bedingten Klimaänderungen mithilfe von Klimamodellen. Ein anderes wichtiges Einsatzgebiet von Klimamodellen ist, das bisherige Verständnis von den in der Atmosphäre relevanten Prozessen zu überprüfen. Wenn es also mit einem Klimamodell gelingt, das Klima der Vergangenheit und Gegenwart zu verstehen, sind auch bessere Vorhersagen für zukünftige Klimaentwicklungen möglich. Aufgrund der Komplexität und Nicht-Linearität des Klimasystems ist man in Klimamodellen immer noch auf vereinfachte Beschreibungen subskaliger (von den Modellen nicht explizit aufgelöster) Prozesse angewiesen, die in Form einer Parametrisierung, z. B. von Strahlungsprozessen, in den Modellen enthalten sind. Gezielte Studien von einzelnen Parametrisierungen oder Prozessen in den Modellen erlauben zum einen ein besseres Verständnis von beobachteten Zusammenhängen, zum anderen kann dadurch aber auch eine Verbesserung der Modelle und der in ihnen durchgeführten Näherungen erreicht werden. Es handelt sich folglich um einen Kreislauf zwischen einem besseren Verständnis der Wirklichkeit durch gezielte Modellstudien und einer verfeinerten Anpassung der Modelle durch gezielte Beobachtungsstudien.

Klimamodelle, die nicht nur die Troposphäre, sondern auch die Stratosphäre und Mesosphäre (Mittlere Atmosphäre) beinhalten, gibt es erst seit Ende der 1980er Jahre (z. B. Überblick von Langematz und Pawson, 1992). Seit Ende der 1990er Jahre beginnt man aufgrund gesteigerter Rechnerkapazitäten Modelle der Mittleren Atmosphäre mit einem interaktiven Chemiemodul zu koppeln (z. B. Austin et al., 2002), um die Wechselwirkungen zwischen Dynamik, Strahlung **und** Chemie, besser berücksichtigen zu können. Die Entwicklung von „Earth System Models (ESMs)“, welche möglichst viele Komponenten des Klimasystems, wie z. B. einen interaktiven Ozean oder die Beschreibung der Biosphäre, enthalten, hat gerade begonnen.

Mit Modellstudien ist es bisher gelungen, den direkten Effekt der 11-jährig variierenden solaren UV-Strahlung auf die chemische, thermische und dynamische Struktur der oberen Stratosphäre zu simulieren. Aus zahlreichen Beobachtungs- und Modellstudien gab es Hinweise, wie dieser direkte Effekt aus der oberen Stratosphäre in die unteren Atmosphärenschichten übertragen werden könnte. Man war allerdings nicht in der Lage, einen physikalischen Mechanismus mit einem Modell nachzuvollziehen. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist, diesen Mechanismus anhand von Modellstudien besser zu verstehen.

Das für diese Arbeit verwendete „Freie Universität Berlin Climate Middle Atmosphere Model (FUB-CMAM)“ ist ein reines Atmosphärenmodell, welches die Tropo-, Strato- und Mesosphäre enthält und kein interaktives Ozeanmodul besitzt. In der hier verwendeten Version des FUB-CMAM ist kein interaktives Chemiemodul enthalten. Sowohl die Meeresoberflächentempera-

turen als auch die Verteilung atmosphärischer Spurengase gehen in Form einer Klimatologie in das Modell ein.

Um den Einfluss der 11-jährig variierenden, stark wellenlängenabhängigen Solarstrahlung so genau wie möglich in dem FUB-CMAM nachzuvollziehen, wurde zunächst die kurzwellige Strahlungsparametrisierung verfeinert. Dies stellt eine erhebliche Verbesserung im Vergleich zu anderen Modellen dar, die eine sehr viel gröbere Strahlungsparametrisierung verwenden. Mit dieser erweiterten Modellversion wurden existierende Modellstudien zum Einfluss der Sonnenvariabilität auf das Klima innerhalb des europäischen Projektes SOLICE (Solar Influences on Climate and the Environment) nachvollzogen (Haigh, 1999a; Shindell et al., 1999) und im Rahmen eines internationalen Modellvergleich-Projektes GRIPS (**G**eneral Circulation Model (GCM)-**R**eality Intercomparison **P**roject for **S**PARC<sup>1)</sup>) mit den Ergebnissen von vier anderen Klimamodellen verglichen. Da die verschiedenen Modellstudien die gleichen Ausgangsdaten benutzten, erlaubte der GRIPS-Modellvergleich erstmals einen gezielteren Vergleich der zu diesem Zeitpunkt existierenden Studien. Die Ergebnisse des GRIPS-Modellvergleiches bildeten die Grundlage für weitere systematische Studien in der vorliegenden Arbeit mit dem FUB-CMAM, in denen die äquatoriale Windklimatologie verbessert wurde.

Die Arbeit gliedert sich wie folgt: In Kapitel 1 wird die Sonne mit ihren Phänomenen und Eigenschaften beschrieben. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Sonnenstrahlung, ihrer spektralen Verteilung sowie ihrer Variabilität. Das Kapitel stellt eine Verbindung zwischen der Sonnen- und der Klimaphysik her, die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit entscheidend ist. Im Kapitel 2 wird ein Überblick über die existierenden Arbeiten zum Einfluss der Sonnenvariabilität auf das Klima gegeben, wobei der Schwerpunkt auf den Arbeiten zum 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus in der Stratosphäre liegt. Am Ende dieses Kapitels werden die Mechanismen für den Einfluss des 11-jährigen Sonnenfleckenzyklus, wie sie zur Zeit bekannt sind, dargestellt. Im Kapitel 3 werden das FUB-CMAM sowie die Weiterentwicklung des Strahlungsmodul und die durchgeführten Experimente detailliert beschrieben. Kapitel 4 gibt einen kurzen Überblick über den internationalen GRIPS-Vergleich der verschiedenen Sonnenexperimente. In Kapitel 5 werden der reine Sonneneinfluss und im Kapitel 6 der Einfluss von Sonne und QBO/SAO dargestellt. Es erfolgt ein Vergleich mit vorangegangenen Modellstudien mit dem FUB-CMAM, der die in der hier vorgestellten Arbeit erzielten Verbesserungen verdeutlicht. In Kapitel 7 wird dann der Einfluss auf die Troposphäre gezeigt, um schließlich die Ergebnisse der Arbeit in Kapitel 8 zu diskutieren und ein weiteres Vorgehen aufzuzeigen.

---

<sup>1)</sup>SPARC: Stratospheric Processes and their Role in Climate, Unterprogramm des „World Climate Research Programmes (WCRP)“ der WMO.