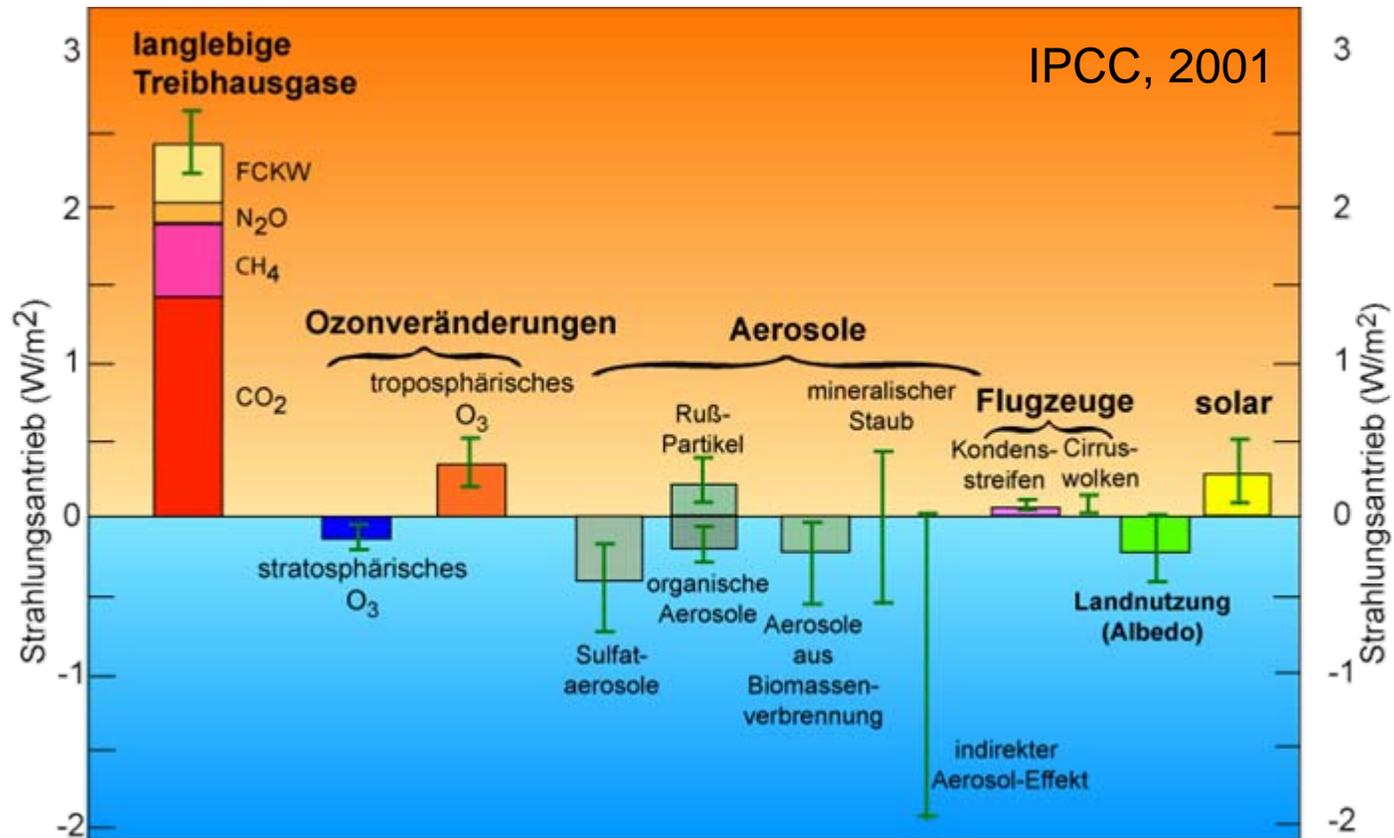


Kapitel 8

Änderungen der Stratosphärentemperatur durch Veränderungen im Strahlungsantrieb



Kapitel 8: Gliederung

- Einleitung
- Strahlungsantrieb (Definition)
- Komponenten des Strahlungsantriebs
- Langzeitänderungen im Strahlungsantrieb
- Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

Strahlungsantrieb: Definition

- Der Strahlungsantrieb der Erdatmosphäre ist ein Maß für die global gemittelten klimarelevanten Störungen, die ein einzelner Faktor (z.B. ein einzelnes Spurengas) auf die Veränderung des Strahlungs- und Energiehaushalts der Atmosphäre hat.
- Er wird in Watt pro m^2 gemessen.
- Er ist ein Index für die Bedeutung dieses Faktors für eine Klimaänderung.
- Der Strahlungsantrieb wird im allgemeinen durch den Unterschied zwischen dem vorindustriellen und dem gegenwärtigen Zustand bestimmt und in der Regel auf die Strahlung an der Obergrenze der Atmosphäre bezogen.

Strahlungsantrieb

- Ein positiver Strahlungsantrieb, z.B. hervorgerufen durch die zunehmende Konzentration langlebiger Treibhausgase, führt zu einer Erwärmung, ein negativer Strahlungsantrieb, z.B. durch die Zunahme von Aerosolen in der Atmosphäre, zu einer Abkühlung der bodennahen Luftschicht.
- Auch natürliche Faktoren, wie eine Veränderung der Solarstrahlung oder Vulkanausbrüche, können zu einem Strahlungsantrieb führen.
- Die Emissionsmenge, das relative Treibhauspotential pro Molekül und die atmosphärische Verweilzeit bestimmen den Anteil der einzelnen Gase am gesamten zusätzlichen Treibhauseffekt.

Strahlungsantrieb

- Die Zunahme der Konzentration treibhauswirksamer Spurengase führt zu einer Veränderung des Strahlungsgleichgewichts der Atmosphäre und damit zu einem Klimawandel.
- Die Störung des Strahlungshaushalts bzw. der Strahlungsantrieb (engl. radiative forcing) durch die anthropogenen Treibhausgase wird durch die Veränderung der Nettostrahlungsflussdichte an der Tropopause in Watt pro Quadratmeter (W/m^2) angegeben.
- Die langlebigen und gleichmäßig verteilten Treibhausgase haben zu einem Strahlungsantrieb von etwa $2,7 \text{ W}/\text{m}^2$ seit dem Anfang des Industriezeitalters geführt.

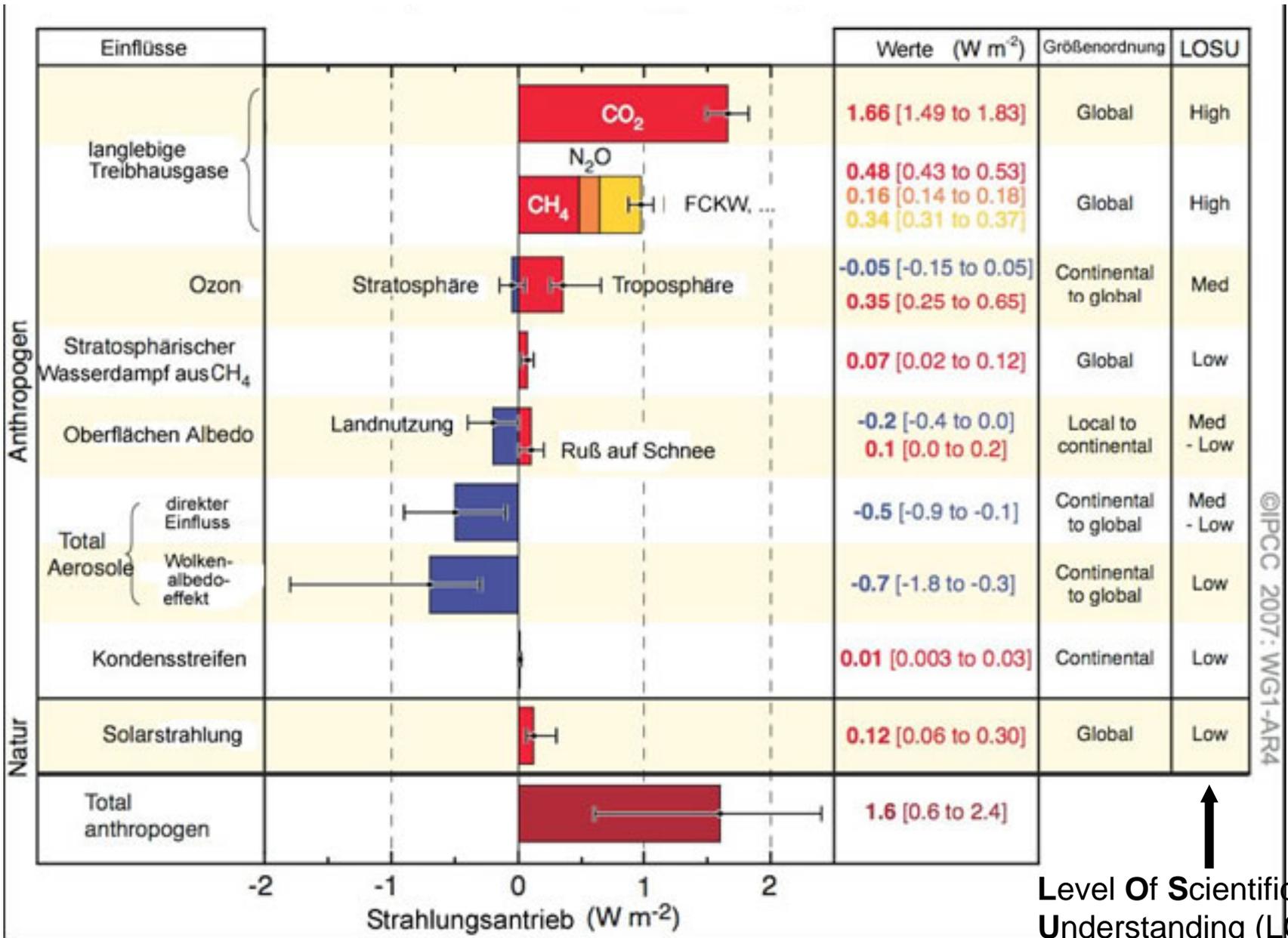
Strahlungsantrieb

- Der Strahlungsantrieb des troposphärischen Ozons ist wegen der ungleichen Verteilung und der Kurzlebigkeit dieses Treibhausgases nur sehr schwer zu quantifizieren und wird auf $0,25 - 0,65 \text{ W/m}^2$ geschätzt.
- Die Abnahme des O_3 -Gehalts in der Stratosphäre hat dagegen einen negativen Strahlungsantrieb von $-0,05$ ($-0,15 - +0,05$) W/m^2 .
- Dem anthropogenen Treibhauseffekt entgegen wirkt auch die vom Menschen verursachte Erhöhung der Aerosolkonzentration in der Atmosphäre.
- Beide Effekte, besonders der letzte, sind schwer abzuschätzen.

Strahlungsantrieb

- Gegenüber den anthropogen verursachten Veränderungen der Strahlungsbilanz ist die Wirkung der Erhöhung der Solarstrahlung auf den Strahlungsantrieb von etwa $0,12 \text{ W/m}^2$ in den letzten 100 Jahren gering.
- Der gesamte **Nettoeffekt** der Veränderung des Strahlungsantriebs **seit 1750** liegt bei etwa **$1,6 \text{ W/m}^2$** .

Komponenten des Strahlungsantriebs (IPCC, 2007)



Langzeitänderungen im Strahlungsantrieb

- Langzeitliche Änderungen des Strahlungsantriebs werden in den kommenden Dekaden weiterhin die globalen Mitteltemperaturen der Troposphäre und der Stratosphäre beeinflussen.
- Wie bereits in Kapitel 6 diskutiert, waren in den vergangenen drei Dekaden der Anstieg der gut durchmischten Treibhausgase und die Abnahme der stratosphärischen Ozonkonzentration die primären Antriebsmechanismen für die Beeinflussung des stratosphärischen Klimas.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Die globalen Konzentrationen der gut durchmischten Treibhausgase werden auch in den kommenden Jahrzehnten weiter ansteigen, obwohl die Steigerungsraten mit großen Unsicherheiten behaftet sind.
- Diese Änderungen werden die Stratosphäre im Mittel abkühlen (siehe Kapitel 2), aber saisonale (und regionale) Erwärmungen besonders in hohen Breiten sind möglich, zum Beispiel durch Änderungen in der Aktivität von planetaren Wellen.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Aus diesem Grund ist die Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der polaren Temperaturen unsicher.
- Die zukünftige Entwicklung der stratosphärischen Wasserdampfkonzentration ist ebenfalls ausgesprochen schwierig, auch vor dem Hintergrund, dass die beobachteten Änderungen in den letzten Jahrzehnten nicht vollständig erklärt werden können (siehe Kapitel 5).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Während die stratosphärische Ozonabnahmen auch auf die Stratosphäre abkühlend wirken, wird damit gerechnet, dass innerhalb der nächsten Jahre der Ozongehalt wieder ansteigen wird.
- Höhere Ozonwerte werden zu höheren Erwärmungsraten führen, was zum Teil der weiteren Abkühlung durch erhöhte Konzentrationen gut durchmischter Treibhausgase entgegen wirken wird.
- Da die Ozonkonzentration sehr stark von Hintergrundtemperatur abhängt ist es erforderlich, das Verständnis der komplexen Wechselwirkungen zwischen sich ändernden Konzentrationen chemischer Substanzen und der Temperatur zu verbessern und zwar durch eine Untersuchung der Kopplungsmechanismen zwischen atmosphärischer Chemie, Strahlung und Dynamik.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Eine wichtige Methode, um die Wechselwirkungen zwischen einer sich ändernden Chemie und Dynamik zu quantifizieren, ist die Anwendung von Klima-Chemie Modellen (engl. Climate-Chemistry Models, CCMs).
- Mit Hilfe der CCMs kann die nicht-linear gekoppelte Entwicklung dynamischer und chemischer Prozesse untersucht werden.
- Eine weiterhin bestehende Herausforderung für Klimamodelle (engl. 'climate model' oder 'coupled ocean-atmosphere general circulation models', AOGCMs) und auch CCMs ist die Vorhersage zukünftiger Veränderungen troposphärischer und stratosphärischer Wellenaktivität.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Eine sich ändernde Wellenaktivität beeinflusst wiederum die Struktur und Entwicklung der Temperaturen in der unteren und oberen Atmosphäre (siehe Kapitel 3).
- Verbesserte Modellsysteme (AOGCMs und CCMs) erlauben einen wertvollen Einblick in Vorgänge, die die zukünftige Entwicklung der Temperaturen bestimmen (z.B. Eyring et al., 2006).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

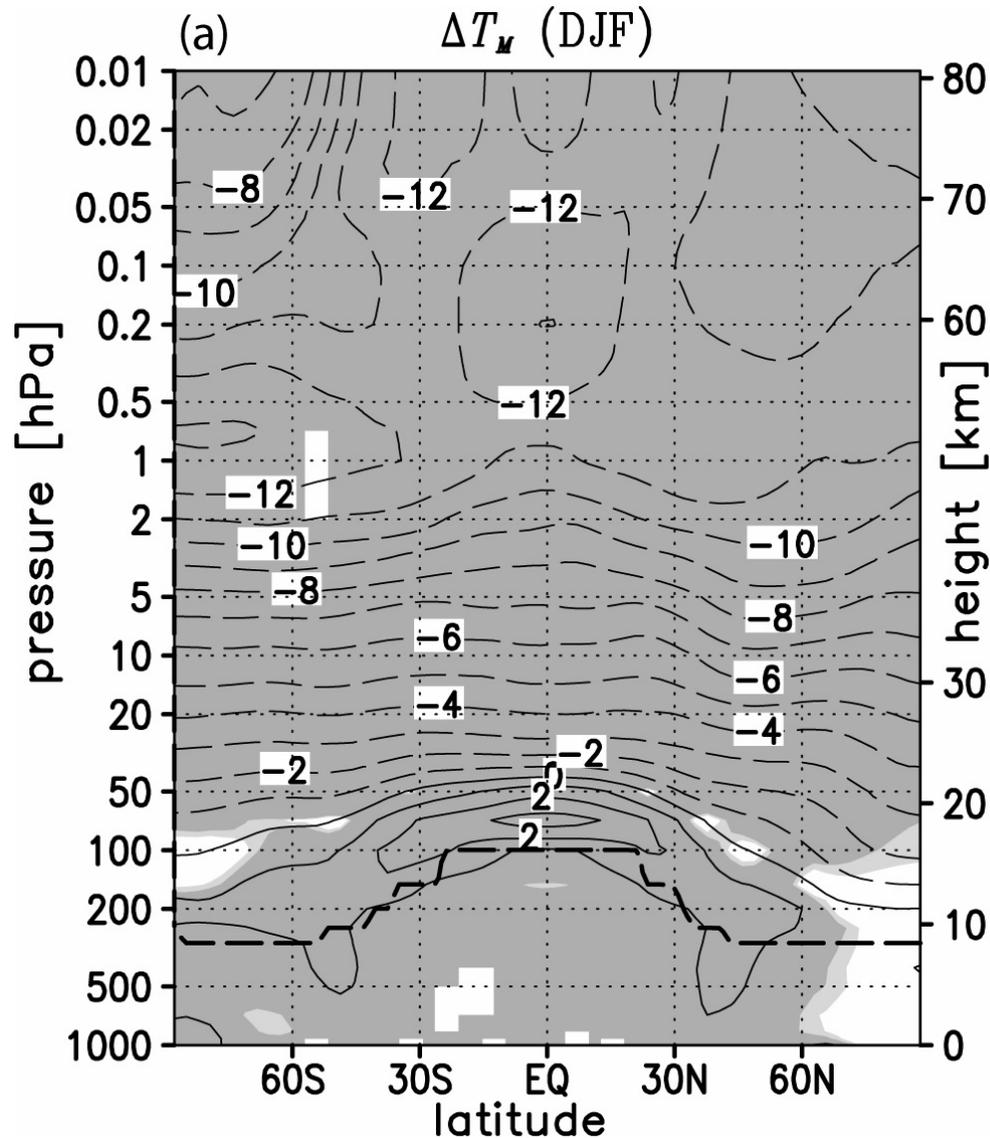
- Modellsimulationen bei verdoppeltem CO₂ Gehalt, sowohl mit als auch ohne interaktive Ozonchemie, zeigen deutliche Temperaturabnahmen in einem Großteil der Mittleren Atmosphäre, mit einer maximalen Abkühlung von 10 bis 12 K im Bereich der Stratopause (Jonsson et al., 2004; Sigmond et al., 2004; Fomichev et al., 2007; siehe Abbildung).

Jonsson, A.I., J. de Grandpré, V.I. Fomichev, J.C. McConnell, und S.R. Beagley, Doubled CO₂-induced cooling in the middle atmosphere: Photochemical analysis of the ozone radiative feedback, *J. Geophys. Res.*, 109, D24103, doi: 10.1029/2004JD005093, 2004.

Sigmond, M., P.C. Siegmund, E. Manzini, und H. Kelder, A simulation of the separate climate effects of middle-atmospheric and tropospheric CO₂ doubling, *J. Clim.*, 17 (12), 2352-2367, 2004.

Fomichev, V.I., A.I. Jonsson, J. de Grandpré, S.R. Beagley, C. McLandress, K. Semeniuk, und T.G. Shepherd, Response of the middle atmosphere to CO₂ doubling: Results from the Canadian Middle Atmosphere Model, *J. Clim.*, 20 (7), 1121–1144, 2007.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung



Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- In diesen numerischen Studien sind Anstiege im Ozon-gehalt durch niedrigere Stratosphärentemperaturen verursacht.
- Andererseits modulieren erhöhte Ozonwerte die CO₂-induzierte Abkühlung durch eine erhöhte Strahlungsabsorption ("Ozonheizung").

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Simulationen mittels CCMs verdeutlichen, wie der Einschluss einer interaktiven Behandlung chemischer Vorgänge die Modelldynamik verändert (z.B. Austin und Butchart, 2003).
- Die Untersuchung fundamentaler dynamischer Prozesse, zum Beispiel die Effekte brechender Schwerewellen (Parametrisierung!) oder die Ausbreitung und Dissipation von planetaren Wellen, ist nach wie vor eine bedeutende Herausforderung der Modellierung.

Austin, J., und N. Butchart, Coupled chemistry-climate model simulations for the period 1980 to 2020: Ozone depletion and the start of ozone recovery, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 129 (595), 3225-3249, 2003.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Ergebnisse aus AOGCM-Simulationen bilden das Fundament für den neuesten Bericht des "Intergovernmental Panel on Climate Change" (IPCC, 2007); sie repräsentieren den derzeit besten und vollständigsten Satz von Klimasimulationen, der bisher erstellt wurde.
- Um die vielen physikalischen Prozesse, die für die Klimavariabilität und die Klimaänderung verantwortlich sind, besser zu erfassen, wurden im Vergleich zu früheren IPCC-Berichten Modelle mit höherer vertikaler und horizontaler Auflösung verwendet.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Während die AOGCMs, die für die IPCC-Studien verwendet wurden, nicht besonders für die Untersuchung stratosphärischer Prozesse entwickelt wurden, wurde in der Zwischenzeit immer deutlicher, dass die genaue Simulation stratosphärischer Prozesse auch für die Bestimmung der Entwicklung des troposphärischen und bodennahen Klimas wichtig ist, genau wie andere Aspekte der Klimaänderung (Baldwin et al., 2007).

Baldwin, M.P., M. Dameris, T.G. Shepherd, How will the stratosphere affect climate change?, *Science*, 316, no. 5831, 1576-1577, doi:10.1126/science.1144303, 2007.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Dies ist der Grund dafür, dass sich die für das 21. Jahrhundert gewählten Annahmen in den IPCC AOGCM Simulationen in erster Linie auf die Vorgaben der möglichen Entwicklungen zukünftiger Konzentrationen der gut durchmischten Treibhausgase (Szenarien) beschränken.
- Dies stellt sicherlich eine Einschränkung für die Abschätzung der Klimaänderung in den nächsten Dekaden dar.
- In dem "hoch" (A2) Szenario wird angenommen, dass die Konzentrationen von CO₂ von heute etwa 380 ppmv im Jahre 2100 auf 850 ppmv ansteigen, während in dem "tief" (B1) Szenario die Werte bis 2100 auf 550 ppmv ansteigen (IPCC, 2001).

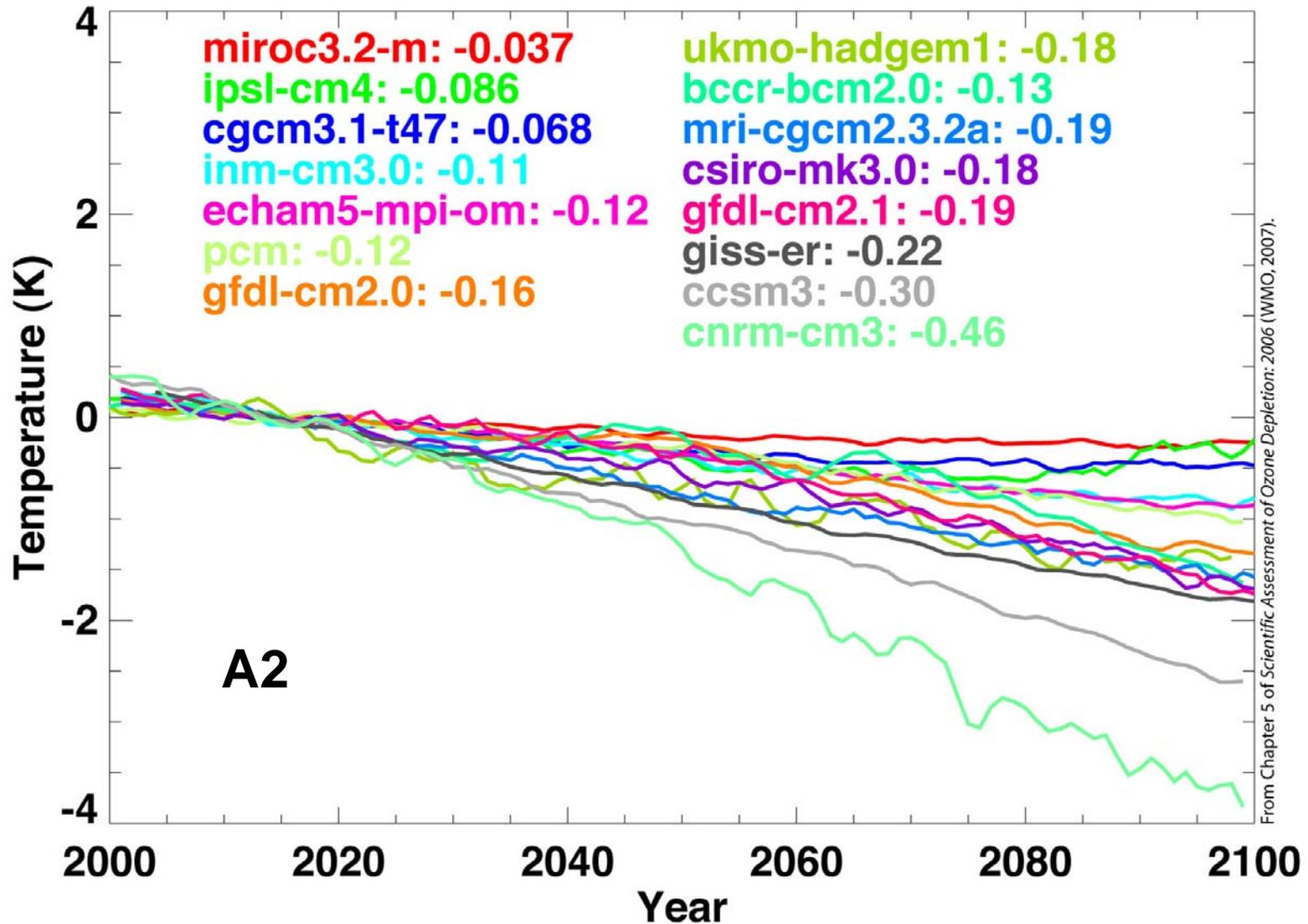
Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- In diesen AOGCM Simulationen werden die Ozonkonzentrationen fest vorgeschrieben, d.h. sie werden nicht interaktiv berechnet.
- Dies stellt eine Einschränkung dar, da die stratosphärische Ozonentwicklung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Entwicklung der Temperaturen in der Stratosphäre haben (siehe unten).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Nachfolgende Abbildung zeigt eine Zeitreihe global gemittelter Temperaturanomalien in 50 hPa (etwa 20 km) zwischen den Jahren 2000 und 2100, wie sie von 15 verschiedenen AOGCMs unter der Annahme des A2 Emissionsszenarios berechnet wurden.
- Alle Simulationen zeigen ein Abkühlung im 21. Jahrhundert in 50 hPa, die Vorhersagen bis 2100 schwanken jedoch zwischen -0.5 und -3.5 K.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung



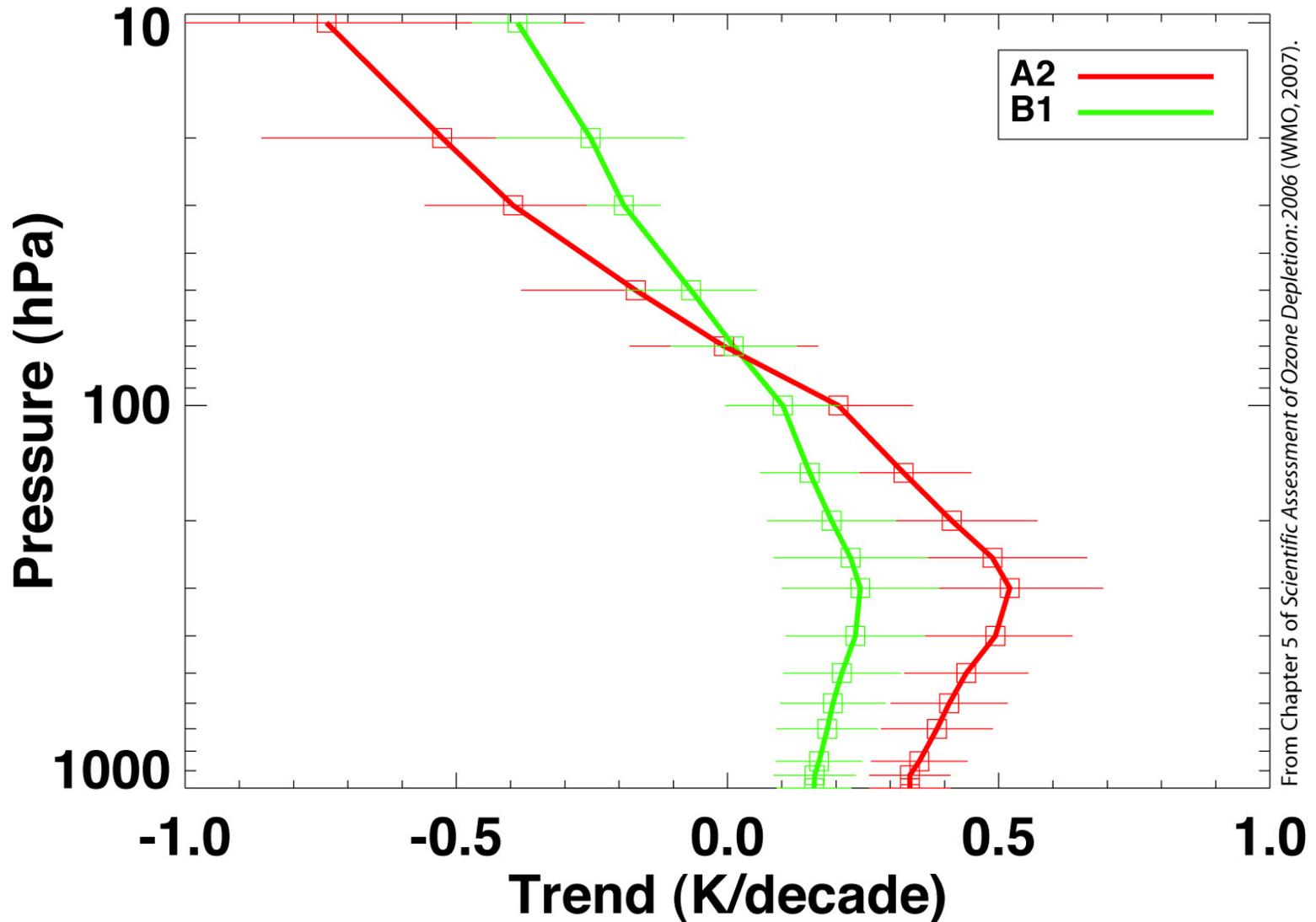
Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Unterschiede in den Ozonkonzentrationen, die in den verschiedenen Modellsimulationen für das 21. Jahrhundert angenommen wurden, sind wahrscheinlich für den großen Unsicherheitsbereich in den Vorhersagen mitverantwortlich.
- Variationen in der Modelldynamik, die begrenzte vertikale Erstreckung in vielen AOGCMs und Unterschiede in den Strahlungsalgorithmen sind mögliche andere Ursachen.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Die relativen Unsicherheiten in den Modellvorhersagen für die zukünftigen Stratosphärentemperaturen ist in der nächsten Abbildung dargestellt. Sie zeigt die für das 21. Jahrhundert berechneten global gemittelten Temperaturtrends von verschiedenen Modellrechnungen (Mittelwerte aller verfügbarer Modellergebnisse!), die für die beiden IPCC Emissionsszenarien B1 ("tief") und A2 ("hoch") durchgeführt wurden.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung



From Chapter 5 of Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 (WMO, 2007).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

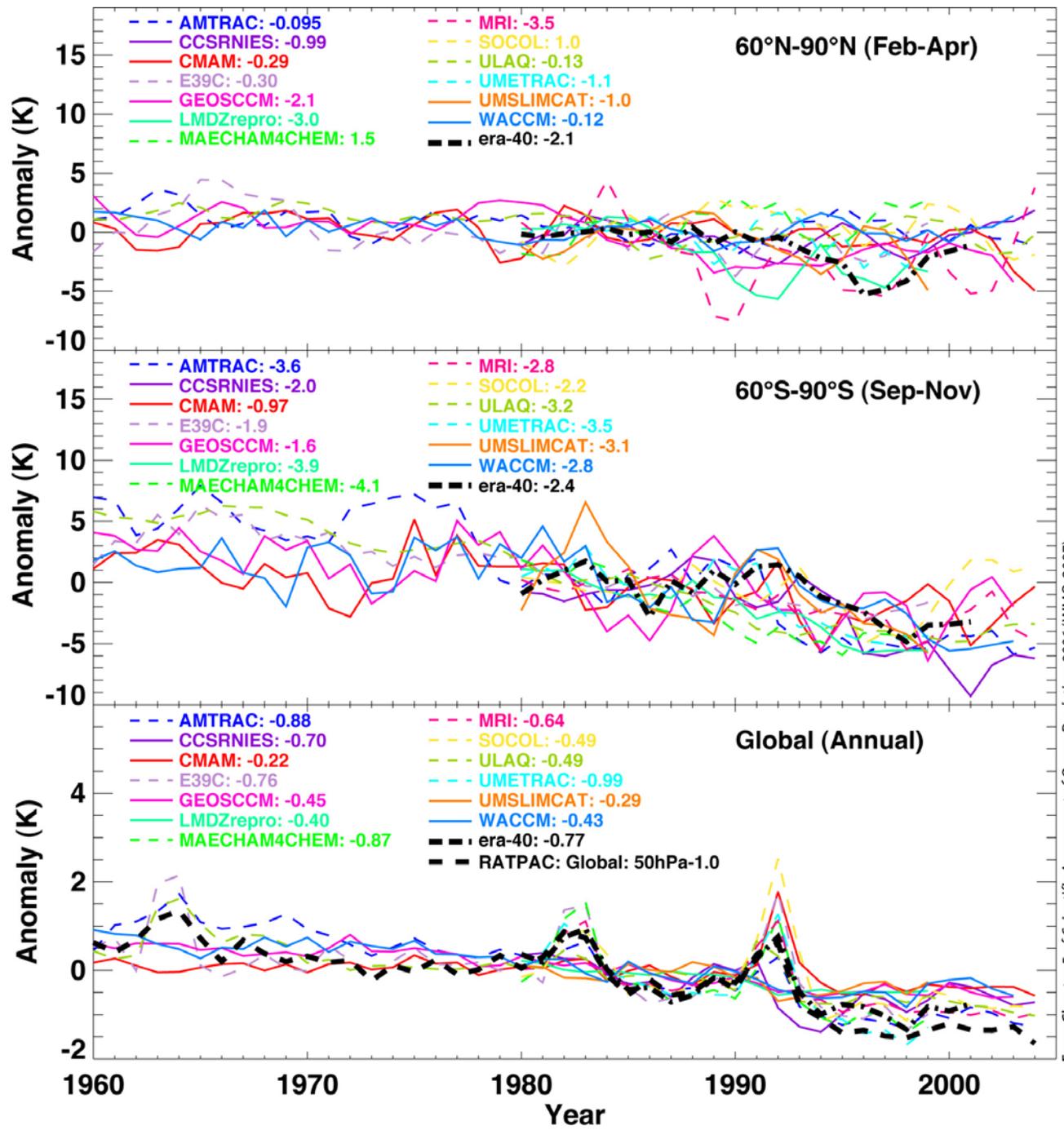
- In der Troposphäre steigen demnach die Temperaturen in diesem Jahrhundert zwischen 0.2 K/Dekade (B1) und 0.5 K/Dekade (A2) für die verschiedenen Emissionsszenarien an.
- In der Stratosphäre ist die Abkühlung ebenfalls stark davon abhängig, welches Emissionsszenario betrachtet wird.
- Die Abkühlungsraten schwanken von 0.07 ± 0.20 K/Dekade (B1) bis 0.18 ± 0.20 K/Dekade (A2) in 50 hPa (etwa 20 km) und 0.38 ± 0.09 K/Dekade (B1) bis 0.72 ± 0.47 K/Dekade (A2) in 10 hPa (etwa 30 km).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- An dieser Stelle sei allerdings nochmals daran erinnert, dass in diesen IPCC AOGCM Simulationen der Ozonantrieb in den verschiedenen Modellstudien für das 21. Jahrhundert variiert und zwar von konstant gehaltenen Ozonkonzentrationen bis hin zu einem langsamen Anstieg des stratosphärischen Ozongehalts; dies trägt zu den großen Unterschieden in den verschiedenen Modellvorhersagen bei.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Eine ähnliche Analyse von global gemittelten Temperaturtrends wurde auf der Grundlage von CCMs durchgeführt (Eyring et al., 2006).
- Diese Modelle berücksichtigen die interaktive Ozonrückkopplung.
- Die Unterschiede zwischen den verschiedenen CCM Simulationen fallen deutlich geringer aus als in den AOGCM Ergebnissen.
- Nachfolgende Abbildung (unterer Teil) zeigt, dass die von CCMs berechneten globalen Temperaturtrends in 50 hPa in guter Übereinstimmung mit ERA-40 und Radiosondendaten (RATPAC) ist und die beobachtete Abkühlung zwischen 1980 und 2004 reproduziert wird.



From Chapter 5 of Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006 (WMO, 2007).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Die aus Modellsimulationen abgeleiteten Temperaturtrends (50 hPa) reichen von -0.22 K/Dekade bis -0.99 K/Dekade (Mittelwert = -0.64 K/Dekade), wobei 7 von 13 CCMs einen statistisch signifikanten Trend berechnen.
- Die aus Beobachtungen abgeleiteten Werte ergeben für ERA-40 -0.77 K/Dekade (statistisch nicht signifikant) und für RATPAC -1.0 K/Dekade (statistisch signifikant).
- Entsprechende Werte abgeleitet aus AOGCM Rechnungen ergeben einen Temperaturtrend von -0.03 bis -0.97 K/Dekade (Mittelwert = -0.38 K/Dekade).

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

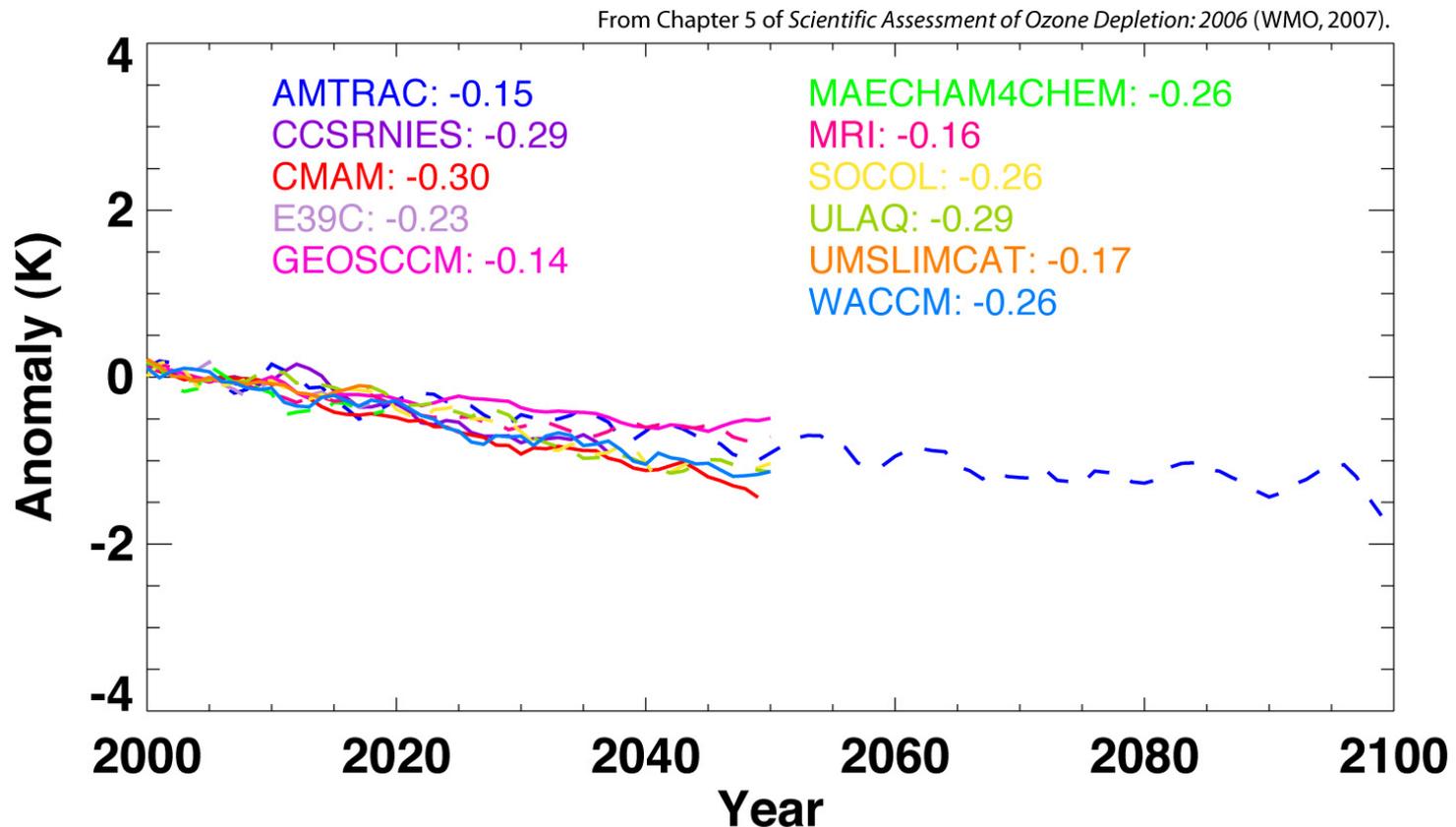
- Die Temperaturstörungen durch Vulkanausbrüche sind in vielen Modell recht gut getroffen, aber meistens wird der Temperatureffekt (Erwärmung) überschätzt (siehe Kapitel 4).
- Eine ähnliche Überschätzung der Erwärmung (in 50 hPa) durch vulkanische Aerosole wird auch in AOGCMs gefunden.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Betrachtet man die Temperaturentwicklung in der polaren unteren Stratosphäre (50 hPa) während der Frühlingsmonate (siehe vorherige Abbildung, mittlerer und oberer Teil) erkennt man eine deutlich höhere Jahr-zu-Jahr Variabilität, die durch den Einfluss der Wellendynamik verursacht wird (siehe auch Kapitel 3).
- Dies ist ein weiterer Grund für die großen Unsicherheiten in der Abschätzung der zukünftigen Entwicklung der stratosphärischen Frühlingstemperaturen in den Polregionen.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Die folgende Abbildung zeigt, dass die Ergebnisse der CCM Simulationen eng beisammen liegen; alle zeigen einen Abkühlungstrend in 50 hPa in den kommenden Jahrzehnten (hier A1B Emissionsszenario).



Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- Die CCM Simulationen verwendeten das IPCC Szenario A1B ("mittel"; business-as-usual), bei dem bis zu Jahre 2100 die CO₂-Konzentration auf 720 ppmv ansteigt.
- Berücksichtigt man alle CCM Abschätzungen bis zum Jahre 2050, so wird ein mittlerer globaler Abkühlungstrend von 0.14 bis 0.30 K/Dekade in 50 hPa abgeschätzt.
- In der unteren Stratosphäre sind die aus CCM Simulationen abgeleiteten Temperaturtrends größer als die entsprechenden Abschätzungen aus AOGCM Ergebnissen (siehe Tabelle).

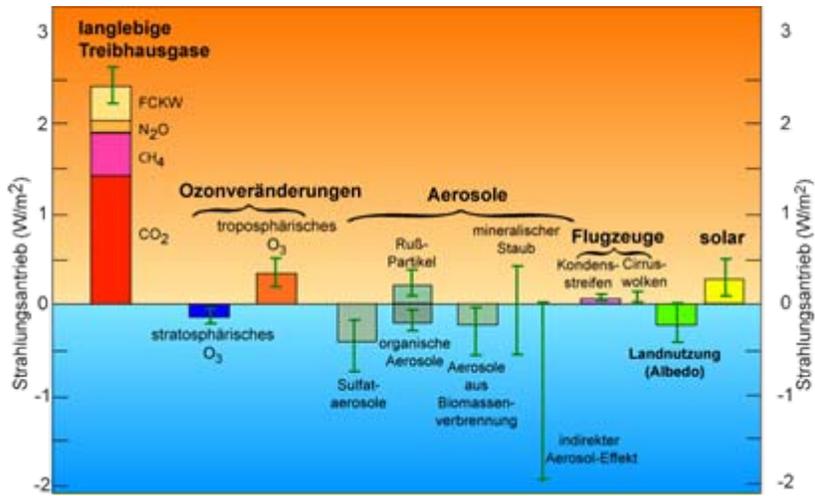
Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

	Emission Scenario (Employed Model) K/decade		
Pressure level	B1 (AOGCM)	A1B (CCM)	A2 (AOGCM)
50 hPa	-0.07 ± 0.20	-0.23 ±0.09	-0.18 ±0.20
10 hPa	-0.38 ±0.09	-0.63 ±0.23	-0.72 ±0.47

Mittlerer linearer Temperaturtrend in K/Dekade berechnet von verschiedenen Modellsystemen für verschiedene Emissionsszenarien; verwendet wurden Modelldaten nach dem Jahr 2000.

Strahlungsantrieb und Temperaturänderung

- In 10 hPa, dort wo die erwarteten Ozonänderungen klein sind, sind die Ergebnisse von CCMs und AOGCMs konsistent.
- Die Tatsache, dass die verschiedenen CCM Ergebnisse deutlich enger beisammen ist unter anderem auch dadurch begründet, dass die vorgeschriebenen Antriebe (z.B. SSTs) klarer definiert waren.
- Sowohl die Ergebnisse von AOGCMs als auch von CCMs zeigen, dass sich die Stratosphäre und Troposphäre verändern werden und dass die Emissionen von gut durchmischten Treibhausgasen eine wichtige Rolle spielen bei der Vorhersage der zukünftigen Entwicklung der Stratosphärentemperatur.



Ende Kapitel 8