

Abschätzung der globalen Erwärmung durch CO₂ und solaren Einfluss



Anmerkung der Redaktion:

Die "Klimasensitivität" genannte Größe wurde erfunden, um der Vermutung auf sinnvolle Weise Rechnung zu tragen, dass die globale Mitteltemperatur der Atmosphäre evtl. auf eine bestimmte Weise durch Anwachsen der Kohlendioxid-Konzentration in die Höhe getrieben werden könnte. Zu diesem Zweck wurden Kräfte definiert (postuliert) sog. "Forcings", deren Einfluss, mittels bestimmter physikalisch begründeter und überwiegend plausibler Annahmen, diese Erhöhung als Abwanderung aus dem Gleichgewicht bewerkstelligen sollen. Einer der dafür erforderlicher Faktoren ist die Klimasensitivität. Sie besagt um wieviel K (°C) die Erwärmung bei Verdopplung der CO₂ Konzentration ansteigt.

Abschätzung der globalen Erwärmung durch CO₂ und solaren Einfluss

Hermann Harde

Helmut-Schmidt-Universität Hamburg, Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg

Unser Verständnis der zurückliegenden und aktuellen Veränderungen unseres Klimas basiert einerseits auf Beobachtungen, aber ebenso auf Untersuchungen von Rückkopplungsprozessen sowie Modellrechnungen zum Klima.

In [dieser Arbeit](#) wird ein weiterentwickeltes Zweilagigen-Klimamodell vorgestellt, das speziell darauf ausgerichtet ist, den Einfluss der ansteigenden CO₂-Konzentration in der Atmosphäre auf die globale Erwärmung sowie die Auswirkungen einer sich ändernden Solaraktivität auf unser Klima zu berechnen.

Das Modell beschreibt die Atmosphäre und die Erdoberfläche als zwei Lagen, die gleichzeitig als Planck'sche Absorber und Strahler wirken. Im Gleichgewicht geben dabei die Erde wie die Atmosphäre über Strahlung sowie den Wärmeaustausch zwischen den Lagen genauso viel Leistung wieder ab, wie sie von der Sonne und der Nachbarlage aufnehmen.

Eine externe Störung, die ihre Ursache in einer Änderung der Solaraktivität oder der Konzentration von Treibhausgasen haben kann, verändert das Gleichgewicht und führt damit zu veränderten mittleren Temperaturen der Erde und der Atmosphäre.

Das Modell berücksichtigt die kurzwellige und langwellige Streuung von Strahlung in der Atmosphäre und an Wolken, insbesondere wird Mehrfach-Streuung und Reflexionen zwischen der Erdoberfläche und den Wolken einbezogen. Es berücksichtigt ebenfalls die üblichen Rückkopplungsprozesse wie Änderungen in der Wasserdampfkonzentration, des Temperaturgefälles mit der Höhe (lapse rate) oder der Erdalbedo. Zusätzlich werden aber auch die von der Temperatur abhängigen Wärme Flüsse durch Konvektion und Evapotranspiration sowie die durch Temperatur und solaren Einfluss induzierten Änderungen des Bewölkungsgrades und deren Rückwirkungen auf das Gleichgewicht mit einbezogen.

Während Klimamodelle Strahlungsverluste und deren Auswirkungen auf die Energiebilanz üblicherweise über den Strahlungsantrieb beschreiben, werden in dieser Arbeit Änderungen von Treibhausgaskonzentrationen direkt auf die kurz- und langwellige Absorption dieser Gase zurückgeführt, die damit die Schlüsselparameter in dem hier dargestellten Modell repräsentieren. Die Absorptionen durch die wichtigsten Treibhausgase Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid, Methan und Ozon werden ermittelt aus Einzel-Linien-Berechnungen, die zurückgreifen auf die HITRAN08-Datenbank und für die Solarstrahlung den Spektralbereich von $0,1 - 8 \mu\text{m}$, für den infraroten Bereich das Spektrum von $3 - 100 \mu\text{m}$ abdecken.

Da sich die Konzentration der Treibhausgase und der atmosphärische Druck mit der Umgebungstemperatur und der Höhe über dem Erdboden ändern, werden die Berechnungen für bis zu 228 Unterschichten von der Erdoberfläche bis in 86 km Höhe und zusätzlich für drei Klimazonen, die Tropen, Mittleren Breiten und die Polarregionen, durchgeführt. Um dann die Absorptionsänderung mit wachsender CO_2 -Konzentration zu erfassen, werden diese Rechnungen für 14 verschiedene Konzentrationen von $0 - 770 \text{ ppm}$ bei sonst identischen Bedingungen wiederholt.

Die sich ändernde Ausbreitungslänge des Sonnenlichts in einer Unterschicht, die abhängt vom Einfallswinkel der Strahlung zur Atmosphäre und damit von der geographischen Länge und Breite, wird berücksichtigt durch die Darstellung der Erde als abgestumpftes Ikosaeder (Bucky Ball), das aus 32 Flächenelementen mit wohldefinierten Winkeln zur einfallenden Strahlung besteht und dann jede dieser Flächen einer Klimazone zugeordnet wird.

Die Ausbreitung der langwelligen Strahlung, insbesondere die von der Atmosphäre selber emittierte Strahlung in Abwärts- und Aufwärtsrichtung, die wesentlich von der Temperaturverteilung in vertikaler Richtung abhängig ist, wird mit einem erweiterten Modell zum Strahlungstransfer für jede Klimazone getrennt berechnet.

Die kurz- und langwelligen Spektren zeigen ein ausgeprägtes Sättigungsverhalten mit wachsender Wasserdampf- und CO_2 -Konzentration sowie eine starke gegenseitige Überlappung. Beide Effekte führen zu einer erheblichen Abschwächung des Treibhauseffektes mit wachsender Konzentration.

Das hier vorgestellte Klimamodell greift auf die in dieser Arbeit berechneten kurz- und langwelligen Absorptionen zurück, um hiermit die Oberflächentemperatur sowie die untere Troposphärentemperatur als Funktion

der CO_2 -Konzentration zu ermitteln. Der Temperaturanstieg bei verdoppelter CO_2 -Konzentration liefert dann unmittelbar die CO_2 Gleichgewichts-Klimasensitivität.

Unterschiedliche Szenarien für wolkenfreien und regulär bewölkten Himmel werden ausführlich untersucht, dies unter Berücksichtigung aller wesentlichen Rückkopplungseffekte sowie solaren Einflüsse. Entsprechende Simulationen zeigen den dominanten Einfluss einer Bewölkungsänderung auf die globale Erwärmung, dies ausgelöst durch eine thermisch und/oder solar induzierte Wolken-Rückkopplung. Insbesondere wird aufgrund dieses starken Wolkeneinflusses deutlich, dass die gemessene Erwärmung im letzten Jahrhundert nur zufrieden stellend erklärt werden kann, wenn ein wesentlicher Anteil dabei einer erhöhten solaren Aktivität zugeordnet wird.

Die Simulationen ergeben eine CO_2 initiierte Erwärmung von $0,2\text{ °C}$ (100 ppm CO_2 -Anstieg) und einen solaren Anteil von $0,54\text{ °C}$ über diesen Zeitraum. Dies entspricht einer CO_2 Klimasensitivität von $0,56\text{ °C}$ (Verdopplung von CO_2) und einer Solarsensitivität von $0,54\text{ °C}$ ($0,1\%$ Anstieg in der Solarkonstanten). Diese Ergebnisse stehen im klaren Widerspruch zu den Darstellungen des IPCC, der den Temperaturanstieg über das letzte Jahrhundert ausschließlich anthropogenen Emissionen von Treibhausgasen (95% Wahrscheinlichkeit) zuordnet und von einer Klimasensitivität zwischen $1,5\text{ °C}$ und $4,4\text{ °C}$ ausgeht, während jeglicher Einfluss durch die Sonne geleugnet wird.

Besonderheiten und Unterschiede zu anderen Untersuchungen

Spektrale Berechnungen

Die spektrale Absorption der Treibhausgase ebenso wie die zum Boden gerichtete und ans All abgegebene langwellige Strahlung stellen die Schlüsselparameter für ein Klimamodell dar, um hiermit die CO_2 Klimasensitivität zu berechnen. Daher werden in dieser Arbeit zunächst die wesentlichen Grundlagen und Ergebnisse dieser Berechnungen zusammengestellt. Hierzu zählen insbesondere:

- Neue Linien-Linien-Spektralberechnungen der Absorption (nicht Strahlungsantrieb):
 - kurzwellige Absorption von $0,1 - 8\text{ }\mu\text{m}$ für *Wasserdampf*, CO_2 , CH_4 ,
 - langwellige Absorption von $3 - 100\text{ }\mu\text{m}$ für *Wasserdampf*, CO_2 , CH_4 und O_3 ,
 - alle wesentlichen Berechnungen mit hoher Spektralauflösung (besser 1 GHz),
 - mit hoher lokaler Auflösung für 228 atmosphärische Schichten über 86 km Höhe
 - und für 3 Klimazonen.
- Detaillierte Strahlungstransferberechnungen für die abwärts und aufwärts gerichtete Infrarotstrahlung, gestützt auf ein neues und verallgemeinertes Strahlungstransfer-Modell.

Klimamodell

Das Modell berechnet den Einfluss einer wachsenden CO_2 -Konzentration sowie

einer erhöhten Solaraktivität auf die globale Erwärmung:

- Es ermittelt die Energiebilanz durch Strahlungs- und Wärmetransfer zwischen Erdoberfläche und Atmosphäre unter Gleichgewichtsbedingungen.
- Es verwendet die berechnete kurz- und langwellige Absorption sowie die auf- und abwärts gerichteten Strahlungsflüsse in der Atmosphäre als Schlüsselparameter für das Klimamodell.
- Es berücksichtigt Wolkeneinflüsse und Vielfachstreuung von kurz- und langwelliger Strahlung an Wolken sowie an der Atmosphäre.
- Die Strahlungs- und Wärmeflüsse sind an entsprechenden Satellitendaten kalibriert.
- Das Modell reagiert auf Bewölkungs-Änderungen mit einer Bodentemperatur-Änderung, die an die *ISCCP*-Beobachtungen über den Zeitraum *1983 – 2010* angepasst sind.
- Es berücksichtigt die bekannten Rückkopplungsprozesse durch Wasserdampf, Änderungen in der vertikalen Temperaturverteilung der Atmosphäre sowie durch Reflexionsänderungen an der Oberfläche.
- Zusätzlich wird ein temperaturabhängiger Wärmetransport durch Konvektion und Evapotranspiration einbezogen, Prozesse, die in anderen Klimamodellen nicht betrachtet werden.
- Das Modell berücksichtigt ebenfalls eine thermisch verursachte Bewölkungsänderung als Rückkopplungsprozess, der angetrieben wird sowohl durch die Treibhausgase wie durch eine veränderte Strahlungsintensität der Sonne und maßgeblich die Klima- ebenso wie die Solarsensitivität bestimmt.
- Alternativ wird eine nicht-thermisch verursachte, rein solar stimulierte Bewölkungsänderung betrachtet, die ausschließlich auf die Solarsensitivität wirkt und die Klimasensitivität unverändert lässt.

Ergebnisse

Als wesentliche Ergebnisse dieser Arbeit sind anzuführen:

- **Die Spektralberechnungen zeigen sehr stark gesättigte Absorptionen für *Wasserdampf* und *CO2* sowie eine**

deutliche Überlappung und gegenseitige Beeinflussung dieser Gase, die den Anteil von *CO2* am Treibhauseffekt wesentlich begrenzen.

- Aus den Strahlungstransfer-Berechnungen für die drei Klimazonen lässt sich das Verhältnis der von der Atmosphäre abgegebenen Wärmestrahlung zum Boden und zum All ermitteln.
- Es werden erstmals Berechnungen zum Einfluss von Wolken auf die globale Temperatur vorgestellt, die sich an den *ISCCP*-Beobachtungen orientieren.
- Die vorgestellten Simulationen erlauben eine klare Unterscheidung von Ergebnissen, die für wolkenfreien und bewölkten Himmel gelten und den dominanten Einfluss der Bewölkung auf die globale Temperatur wie auf die Klimasensitivität wiedergeben.
- Die Klimasensitivität bei

mittlerer Bewölkung (66 %) ist nur halb so groß wie unter wolkenfreien Bedingungen.

– Rückkopplungen:

o *Wasserdampf-Rückkopplung*: Sie wird ermittelt aus den Spektralberechnungen für die drei Klimazonen und liefert einen deutlich niedrigeren Beitrag als in den *IPCC*-Berichten aufgeführt. Sie besteht aus einem stärkeren positiven Anteil, verursacht durch die mit der Temperatur ansteigende langwellige Absorption, und einem kleineren, dämpfenden Anteil durch die kurzwellige Strahlung.

Der lineare Anstieg der Absorptionen mit der Temperatur ergibt sich aus dem exponentiellen Anstieg der Wasserdampfkonzentration entsprechend dem Clausius-Clapeyron-Gesetz und andererseits einer logarithmischen Zunahme der Absorptionen mit der Dampfkonzentration aufgrund der

spektralen Sättigungseffekte.

o Vertikale Temperaturänderung:
Aufgrund der sich ändernden Strahlungsflüsse in Abwärts- oder Aufwärtsrichtung bei veränderter vertikaler Temperaturverteilung in der Atmosphäre (lapse rate) ergibt sich ein resultierender positiver Rückkopplungsbeitrag im Unterschied zu Angaben in der Literatur, wo i.a. von einer leicht negativen Rückkopplung ausgegangen wird.

o Oberflächen-Albedo: Vom IPCC übernommen.

o Konvektion: Bei wachsender CO₂-Konzentration steigt die Temperatur der unteren Troposphäre weniger rasch an als die Bodentemperatur. Als Folge nimmt der Wärmefluss durch Konvektion und Wärmeleitung vom Boden zur Atmosphäre weiter zu und trägt zu einer negativen Rückkopplung bei.

o *Evapotranspiration*: Ebenso erhöht sich mit zunehmender Bodentemperatur der latente Wärmefluss und trägt damit zu einem deutlich negativen Rückkopplungsbeitrag bei.

o *Thermisch induzierte Bewölkungsänderung*: Eine thermisch angetriebene Änderung der Bewölkung kann verursacht werden durch Treibhausgase, hier dem CO_2 , und ebenso durch Schwankungen in der solaren Strahlungsleistung. Änderungen in der Bewölkung verursachen eine starke positive Rückkopplung, die sich in diesem Fall sowohl auf die Klima- wie auf die Solarsensitivität auswirkt.

o *Nicht-thermische solar induzierte Bewölkungsänderung*: Der Bewölkungsgrad kann ebenfalls beeinflusst werden durch kosmische Strahlung und/oder erhöhte UV-Strahlung, die beide ihre Ursache in Änderungen der Solaraktivität haben. Diese

Rückkopplung wirkt nur auf die Solarsensitivität und lässt die Klimasensitivität unbeeinflusst.

– Aufgrund der unterschiedlichen Auswirkungen der zwei Bewölkungseffekte auf eine globale Erwärmung erlauben die Simulationen eine Unterscheidung von thermisch und solar induzierten Bewölkungsänderungen sowie eine Angabe über die Wichtung dieser Beiträge.

– Berechnete Klima- und Solarsensitivitäten:

o Ohne jede thermisch oder solar verursachte Bewölkungsänderung, aber unter Berücksichtigung aller weiteren relevanten Rückkopplungsprozesse (Wasserdampf, vertikale Temperaturverteilung, Albedo, Konvektion und Evapotranspiration) berechnet sich die Klimasensitivität zu $CS = 0.43^{\circ}C$.

Dieser sehr niedrige Wert ergibt sich aufgrund der stark gesättigten Wasserdampf- und CO_2 -Absorption, der niedrigen Wasserdampf-Rückkopplung und der negativen Rückkopplungen durch Konvektion und Evapotranspiration.

o Mit CO_2 induzierter thermischer Bewölkungs-Rückkopplung (in Übereinstimmung mit den *ISCCP*-Beobachtungen zur Bewölkungsänderung), aber ohne Berücksichtigung eines thermischen Solaranteils ergibt sich eine maximale Klimasensitivität von $CS = 1.73^\circ C$.

Ein Anstieg um $100 \text{ ppm } CO_2$ über das letzte Jahrhundert würde unter diesen Annahmen dann zu einer globalen Erwärmung von $0.6^\circ C$ beitragen.

o Mit thermisch induzierter Bewölkungs-Rückkopplung, verursacht durch CO_2 sowie einer erhöhten Solaraktivität von 0.2% über das letzte Jahrhundert würde sich eine unrealistisch hohe globale Erwärmung

von $1.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ($0.6 + 0.72 \text{ }^{\circ}\text{C}$) ergeben.

o Ohne thermische aber solar induzierte Bewölkungs-Rückkopplung (in Übereinstimmung mit den *ISCCP*-Beobachtungen zur Bewölkungsänderung) wird eine Klimasensitivität von $CS = 0.43 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine Solarsensitivität von $SS = 0.32 \text{ }^{\circ}\text{C}$ errechnet.

Bei einer erhöhten Solaraktivität von 0.2% über das letzte Jahrhundert steuert dann die Sonne eine Erwärmung von $0.64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und CO_2 nur $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ bei in Übereinstimmung mit der gemessenen globalen Erwärmung von $0.74 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

o Für eine niedrigere Solaraktivität von nur 0.1% und ebenfalls einer kleineren zugrunde gelegten negativen Konvektions- und Evapotranspirations-Rückkopplung ergibt sich eine Klimasensitivität von $CS = 0.56 \text{ }^{\circ}\text{C}$, die Solarsensitivität zu $SS = 0.54 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Dann steuert CO_2 $0.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Sonne $0.54 \text{ }^{\circ}\text{C}$ zur Erwärmung bei.

Um alle Randbedingungen einer erhöhten

Solaraktivität und CO₂-Konzentration über das letzte Jahrhundert erfüllen zu können, und dies in Übereinstimmung mit der beobachteten Erwärmung sowie der Änderung der Wolkenbedeckung in der Zeit 1983 – 2010, wird eine Kombination beider die Bewölkung beeinflussenden Mechanismen herangezogen mit einem thermischen Anteil von 9 % und einem dominierenden Solarbeitrag von 91 %.

o Ein Wert für die Gleichgewichts-Klimasensitivität von ~ 0.6 °C stellt dabei eher eine obere Grenze hierfür dar. Wird eine Solaranomalie von 0.2% zugrunde gelegt, reduziert sich dieser Wert auf nur ~ 0.4 °C.

Anmerkung des Autors

in New York wurde vor kurzem der Klimagipfel von Ban Ki-Moon eröffnet mit dem Ziel, weiter die Staaten auf eine Reduzierung von Treibhausgas-

Emissionen einzuschwören. All dies basiert auf den phantastisch aufgeblähten Werten des IPCC zur Klimasensitivität.

Wie Sie wissen, beschäftige ich mich seit geraumer Zeit mit einer möglichst soliden und auch nachvollziehbaren Berechnung dieser Größe, bei der ich zu deutlich niedrigeren Werten komme.

Das Spektakel in New York möchte ich daher zum Anlass nehmen, Sie auf einen neuen Artikel von mir aufmerksam zu machen, der als Open Access in der Zeitschrift *Open Journal of Atmospheric and Climate Change* seit Anfang September auf der Webseite <http://www.scipublish.com/journals/ACC/recent> einzusehen ist.

Um Sie zu motivieren, den etwas umfangreicheren Artikel auch zu Ende zu lesen, füge ich eine Zusammenfassung bei, in der die Besonderheiten, Neuheiten und

**Unterschiede zu anderen Untersuchungen
zusammengestellt sind.**