

Einführung in die Klimamodellierung

Klimamodellrechnungen sind zu einer wichtigen Grundlage für gesellschaftliche und politische Entscheidungen zum Klimaschutz und zur Eingrenzung der Folgen des Klimawandels geworden. Es ist möglich unser Klima vorherzusagen, weil sich das Klimasystem gemäß physikalischen Gesetzmäßigkeiten entwickelt. Unser Klima wird im Wesentlichen durch die Energiebilanz von Strahlungsflüssen und den turbulenten Flüssen von fühlbarer und latenter Wärme beschrieben, denn diese Energiebilanz bestimmt die Höhe der Temperatur im Lebensraum des Menschen. Die Klimamodellierung hat im letzten halben Jahrhundert infolge der ständigen Entwicklung schnellerer und leistungsfähigerer Rechneranlagen eine rasante Entwicklung durchgemacht. So können heute hochauflösende komplexe gekoppelte Ozean-Atmosphärenmodelle betrieben werden, die die Physik der Erde sehr realistisch abbilden können. Die drei für das Klimasystem wichtigsten Gesetze sind die Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie.

Klimamodelle

Hier soll zunächst geklärt werden, weshalb es unterschiedliche Klimamodelle gibt, wenn die zugrundeliegende Physik doch die gleiche ist. Das Klimasystem der Erde ist komplex, da es viele unterschiedliche Prozesse gibt, die sich auf unterschiedlichen Raum- und Zeitskalen abspielen. Für eine realistische Prognose sollten alle diese Prozesse berücksichtigt werden. Das ist aber nicht möglich, da die Klimamodelle nicht mit beliebig hoher Auflösung gerechnet werden können. Es müssen einige Prozesse vernachlässigt werden oder können nur mit einem geeigneten Näherungsverfahren berücksichtigt werden. Die mathematische Beschreibung des Klimasystems erfolgt auf Grundlage verschiedener Differentialgleichungen, die derartig komplex sind, so dass diese mit Hilfe von numerischen Näherungsmethoden berechnet werden. Für diese Verfahren wird die Erde mit einem Rechengitter überzogen und die Gleichungen diskretisiert (d.h. man rechnet mit Δx , Δt , usw.). Für jeden Gitterpunkt müssen stets alle Gleichungen gelöst werden, so dass die Gitterauflösung aufgrund der Rechenkapazität begrenzt ist. Langzeitprognosen benötigen selbst auf den modernen Hochleistungsrechnern eine enorme Rechenzeit und sind kostenintensiv. Somit ist unter Berücksichtigung der Fragestellung und Kosten eine Entscheidung über die Modellauflösung zu treffen. Daher müssen physikalische Prozesse, die auf kleineren Skalen stattfinden, für das Gesamtsystem aber von Bedeutung sind, in einer sinnvollen Weise eingebunden werden. Betrachtet man beispielsweise Reibungsprozesse, die für den Impulstransport von großer Bedeutung sind, so treten dabei in der Atmosphäre und im Ozean kleinskalige turbulente Prozesse auf, die in einem globalen Klimamodell, was mit einer horizontalen Auflösung von 2° (mehr als 30 km am Äquator) arbeitet, nicht dargestellt werden können. Die Art und Weise, in der solche Prozesse parametrisiert werden, variiert, denn es gibt eine Vielzahl von Möglichkeiten, diese anzunähern. Da wiederum eine Vielzahl an Prozessen parametrisiert werden müssen, hat sich eine Vielfalt an Modellen entwickelt. Jedes dieser Modelle wird anhand von Rechnungen für vergangene Zeiträume geprüft und mit realen Messwerten verglichen, bevor damit zukünftige Szenarien gerechnet werden. Interessant ist, dass die Klimavorhersagen aller Modelle, obwohl sie die Physik in manchen Bereichen auf unterschiedliche Weise darstellen, ähnliche Ergebnisse für die Klimaszenarien liefern.

Das Monash Simple Climate Model

Das Modell mit dem wir uns im Unterricht befassen werden ist das Monash Simple Climate Model [Dommenget und Floeter, 2011]. Es ist ein global aufgelöstes Energiebilanzmodell, welches aufgrund seiner starken Vereinfachungen nicht in der Lage ist, das Klimasystem in seiner Komplexität abzubilden. Es ist aber so konzipiert worden, dass es die wichtigsten Charakteristika der globalen Erwärmung enthält. Das Modell bildet eine Brücke zwischen einfachen Konzeptmodell und den komplexen hochauflösenden 4-

dimensionalen gekoppelten Zirkulationsmodellen. Es ist konzipiert worden, um grundlegende Untersuchungen des Klimasystems durchzuführen und für das Studium bestimmter Prozesse oder es wird zu Lehrzwecken eingesetzt. Mit Hilfe des Modells ist es möglich, wichtige Rückkopplungsmechanismen und selbstverstärkende Prozesse im Klimasystem aufzuspüren und zu verstehen. Weiterhin lassen sich aufgrund des vergleichsweise geringen Rechenaufwands lange Zeiträume und die verschiedensten Szenarien prognostizieren. Das Modell basiert auf einer einfachen Energiebalance und berücksichtigt die solare und thermische Strahlung, dem atmosphärischen Wasserkreislauf, die turbulenten Wärmeflüsse, dem Wärmeaustausch mit dem Ozean und den horizontalen Wärmetransport in der Atmosphäre. Obwohl die Atmosphäre in diesem Modell nur als eine Schicht betrachtet wird, liefert das Modell ein adäquates Bild typischer Phänomene der globalen Erwärmung (winter amplification, equilibrium land-sea warming contrast, inter-hemispheric warming gradient), sowohl in der Struktur, als auch der Amplitude.

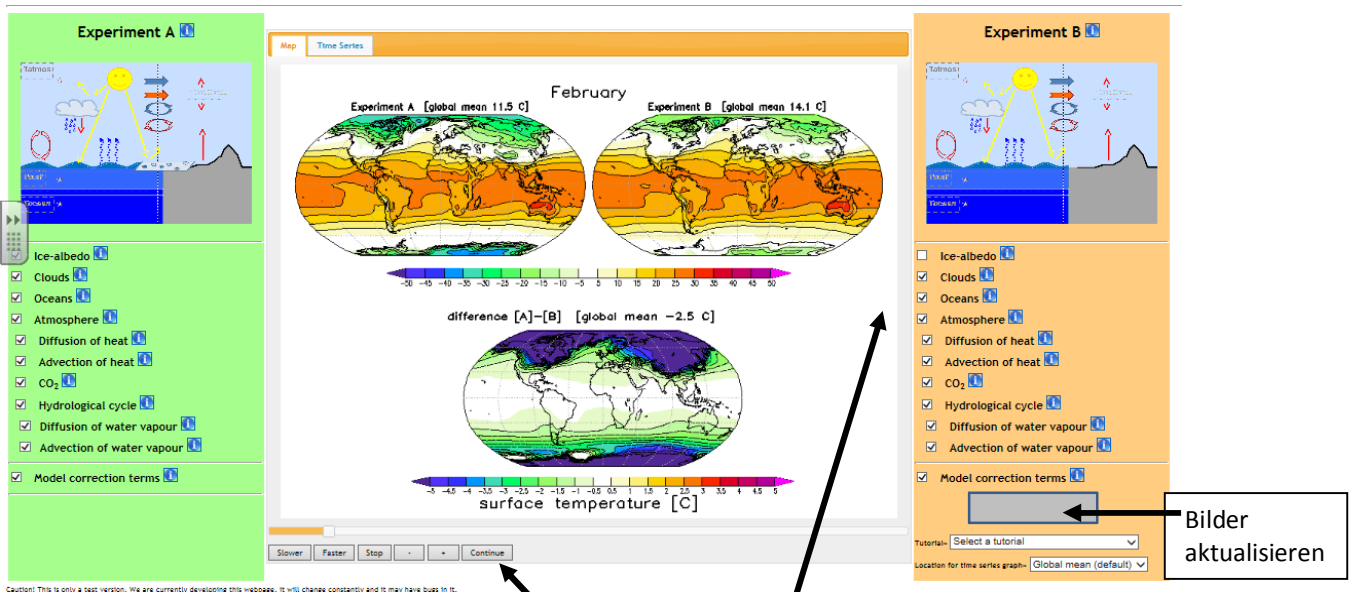
Webinterface:

In diesem Simulationsexperiment kannst du Prozesse des Monash-Klimamodells aktivieren oder deaktivieren. Das ermöglicht dir zu untersuchen, wie die unterschiedlichen Elemente des Klimasystems miteinander wechselwirken und das Klima verursachen, wie wir es kennen.

Du hast elf Schaltflächen, die dir 2048 Kombinationen ermöglichen. Nicht alle dieser Kombinationen sind jedoch möglich (z.B. eine aktivierte Wasserdampfdiffusion und ein gleichzeitig deaktivierter Wasserkreislauf), aber du hast ungefähr 400 Experimente, die möglich sind.



Beachte, dass die Graphiken aktualisiert werden müssen, nachdem du eine der Schaltflächen geändert hast, um die Ergebnisse zu sehen.



Steuerung des Jahresgangs

Auswahl der Prozesse

Bilder aktualisieren

Wie funktioniert der Datenvergleich?

Die Webinterface ermöglicht einen bequemen Vergleich zweier Modellläufe.

- Links wählt man die Konfigurationen für das Experiment A und rechts die Konfigurationen für das Experiment B durch das Anklicken der Prozesse.
- In der Mitte werden die Monatsmittelwerte der Temperaturverteilung beider Modelle und auch die Differenz angezeigt.
- Es erfolgt gleichzeitig eine Darstellung des Jahresverlaufs. Mit Hilfe der grauen Menüleiste (unten) kannst du die Geschwindigkeit der zeitlichen Darstellung variieren oder diese stoppen.

Untersuchung klimarelevanter Prozesse

1. Sea-Ice-Albedo

Um den Effekt der Schnee und Eisbedeckung auf die Temperaturverteilung zu untersuchen, solltest du im Experiment A alle Prozesse anklicken, um sie einzuschalten. Im Experiment B schaltest du die Ice-Albedo aus.

Im mittleren Feld erscheinen nun die Monatsmittel der Temperatur für Experiment A (links) und Experiment B (rechts) in ihrer zeitlichen Abfolge und darunter ist die Temperaturdifferenz beider Simulationen dargestellt. Diese Darstellung ermöglicht es dir die Modellläufe zu vergleichen und den Effekt der Eisalbedo auf die Temperaturentwicklung zu untersuchen.

Aufgabe 1

Beschreibe die Unterschiede der Modellergebnisse. Untersuche die räumlichen Unterschiede und auch saisonale Veränderungen.



Aufgabe 2 Was verbirgt sich physikalisch dahinter?

Erkläre die Beobachtungen mit Hilfe der durch das Meereis verursachten Änderungen in der Strahlungsbilanz.



Dazu...

- Nutze die nebenstehende Abbildung zur Eisbedeckung.
- Führe ein zweites Experiment durch und schalte im Experiment A nur die Eis-Albedo ein und im Experiment B alle Prozesse aus. So kannst du den Effekt der Albedo isolieren.

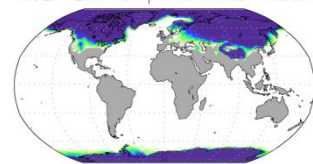
(Im ersten Experiment hast du den Effekt der Eis-Albedo im kompletten Klimasystem diskutiert, während alle anderen Prozesse gleichzeitig aktiviert waren, also auch Wechselwirkungs- und Rückkopplungsmechanismen eine Rolle spielen. Der Effekt, den jeder Prozess auf das Klimasystem hat, ist oft besser zu sehen, wenn nur ein Prozess aktiviert ist. Ein Vergleich der Experimente zeigt, wie das Zusammenspiel mit den anderen Prozessen des Klimasystems den Effekt eines Prozesses verändern kann. Außerdem verdeutlicht es, dass die Rolle eines Prozesses von dem durchschnittlichen Klimazustand selbst abhängt.)

- Informiere dich unter:

<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Meereis>

<http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Eis-Albedo-R%C3%BCckkopplung>

NCEP 2m Temp <0 winter mean



NCEP 2m Temp <0 summer mean

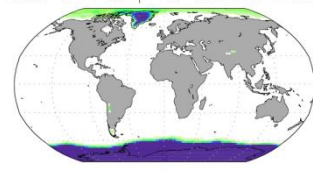


Figure 1.11: Snow / sea ice cover

Die Modellphysik

Die Eis- und Schneebedeckung haben zwei wichtige Effekte auf das Monash-Klimamodell:

- 1.) Das Eis und der Schnee verändern die Albedo der Oberfläche und damit auch die Absorption der solaren Einstrahlung.
- 2.) Die Meereisbedeckung ändert die effektive Wärmekapazität der Ozeane und isoliert die ozeanische Deckschicht vom Wärmeaustausch mit der Atmosphäre.

Für die zeitliche Temperaturänderungen im Modell gilt:

$$\lambda_{surf} \frac{dT_{surf}}{dt} = F_{solar} + F_{thermal} \quad (1)$$

Dabei ist λ_{surf} die Wärmekapazität an der Erdoberfläche oder der obersten Ozeanschicht, F_{solar} der Einfluss der solaren Einstrahlung und $F_{thermal}$ der Einfluss durch die thermische Abstrahlung der Erde.

Für die solare Einstrahlung gilt:

$$F_{solar} = \frac{1}{4}(1 - \alpha_p)S_0 \quad (2)$$

Sie ist abhängig von der planetaren Albedo $\alpha_p = 0,3$ und der Solarkonstante $S_0 = 1365 \text{ W/m}^2$.

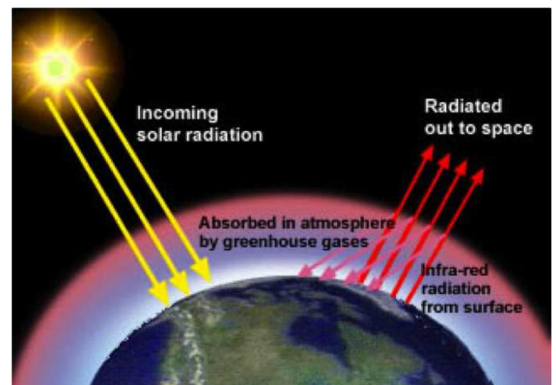
Aufgabe: Berechne den Wert der solaren Einstrahlung.

Die thermische Strahlung berechnet sich mit Hilfe des Stefan-Boltzmann-Gesetzes für schwarze Körper:

$$F_{thermal} = -\sigma T_{surf}^4 \quad (3)$$

Die Stefan-Boltzmannkonstante σ beträgt $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$.

Die thermische Strahlung der Erde wird oft auch als langwellige Strahlung bezeichnet, weil sie im Vergleich zur einfallenden Sonnenstrahlung eine größere Wellenlänge aufweist.



Aufgabe: Setzt man Gleichung (2) und (3) in Gleichung (1) ein, so erhält man eine Gleichung für die Temperaturänderung dT_{surf}/dt in Abhängigkeit von T_{surf} , also eine Differentialgleichung.

Gib die Gleichung an.

Aufgabe: Sind einfallende und ausfallende Strahlung gleich groß, so ergeben sich keine Temperaturänderungen. Berechne die „Gleichgewichtstemperatur“ und vergleiche sie mit dem globalen Temperaturmittel von 15°C (273 K entsprechen 0°C).

Aufgabe: Bei diesen Betrachtungen wurde der Treibhauseffekt noch nicht berücksichtigt. Er beeinflusst, die aufgestellte Strahlungsbilanz erheblich, soll aber hier nicht weiter mathematisiert werden. Beschreibe den Einfluss des Treibhauseffekts qualitativ.

Info-Button

Ice-Albedo

Die Albedo ist ein Maß für das Rückstrahlungsvermögen von nicht selbst leuchtenden Oberflächen. Sie wird bestimmt durch den Quotienten aus reflektierter zu einfallender Strahlung und liegt daher zwischen 0 und 1. Ein Rückstrahlungsvermögen von Null entspricht einer vollständigen Absorption und führt aufgrund dessen zu einer starken Erwärmung und ein Wert von 1 bedeutet, dass das einfallende Licht vollständig reflektiert wird. (Ihr kennt das: Im Sommer tragen wir lieber weiße Kleidung als dunkle.) Eis reflektiert das einfallende Licht teilweise vollständig, denn seine Kristallflächen wirken wie kleine Spiegel.

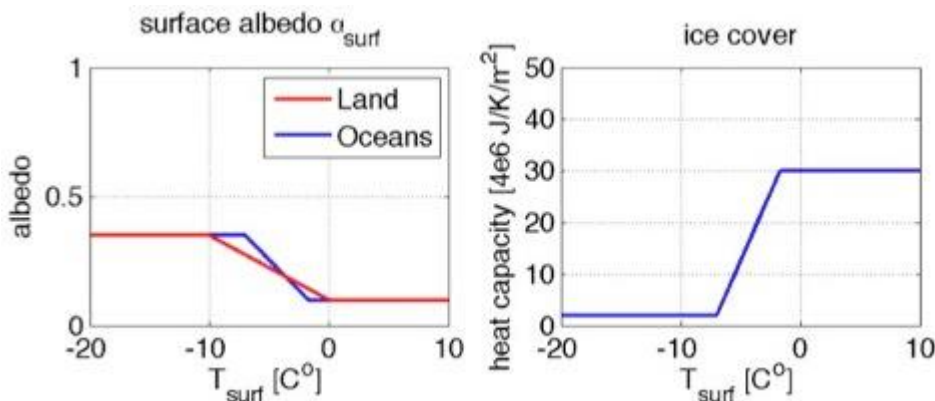
Umsetzung in Modell (Übersetzung INFO BUTTON)

Die Eis- und Schneebedeckung haben zwei wichtige Effekte auf das Monash-Klimamodell:

- 3.) Das Eis und der Schnee verändern die Albedo der Oberfläche und damit auch die Absorption der solaren Einstrahlung.
- 4.) Die Meereisbedeckung ändert die effektive Wärmekapazität der Ozeane.

Ein Punkt im Ozean, der mit Meereis bedeckt ist, hat eine Grenzschicht mit der Wärmekapazität einer 2-Meter Wassersäule und die Deckschicht des Ozeans ist komplett von dem Wärmeaustausch mit der Atmosphäre isoliert.

Sowohl der Effekt durch die Schnee- und Eisbedeckung auf die Albedo als auch die Wärmekapazität sind in dem Monash-Klimamodell als lineare Funktionen der Oberflächentemperatur in einem Temperaturintervall simuliert.



Links: Die Albedo als Funktion der Oberflächentemperatur. Rechts: Die Wärmekapazität als Funktion der Meeresoberflächentemperatur.