

Diss. ETH No. 19747

# **The Earth's energy balance and its changes**

—

## **Implications for past and future temperature change**

A dissertation submitted to the

ETH ZURICH

for the degree of

DOCTOR OF SCIENCES

presented by

**Markus Huber**

Dipl. Phys. ETH Zurich

born 1 June 1985

citizen of Jonen (AG)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Reto Knutti, examiner

Dr. Gian-Kaspar Plattner, co-examiner

Prof Dr. Martin Wild, co-examiner

Zurich 2011

# Abstract

The energy balance is key to understand the Earth's climate and its variations caused both by natural and anthropogenic changes in the atmospheric composition. Changes in the energy balance have been confirmed by observations and model simulations. The concept of radiative forcing has been introduced to quantify the changes of the energy flows at the top of the atmosphere through both anthropogenic and natural forcing agents. The energy balance represents fundamental physical concepts such as the conservation of energy and links radiative forcing and changes in global average temperature and heat uptake by the world's oceans to climate sensitivity. The equilibrium climate sensitivity is defined as the equilibrium change in global average temperature for a doubling of the pre-industrial atmospheric carbon dioxide concentration. Climate sensitivity governs along with ocean heat uptake the long-term response of the climate system to changes in the Earth's energy balance.

The aim of this thesis is to assess the constraints of the energy balance and its changes both on climate system properties such as climate sensitivity and on projections of future global temperature change. Emphasis is placed on the quantification of uncertainties attached to observations of past changes in the climate system and their effects on estimates of climate sensitivity and projected temperature change. Climate models of different complexities are employed to account for structural and parametric uncertainty. The substitution of a climate model of intermediate complexity with an artificial neural network plays a key role in this thesis.

Chapter 2 considers the mean state of the Earth's energy balance and relates radiative indices computed with a set of state-of-the-art coupled Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCMs) to their corresponding equilibrium climate sensitivities. The simple indices were previously used to describe climate variability and changes in global temperature and include response patterns such as the land-ocean contrast, inter-hemispheric differences and the magnitude of the annual cycle. Various satellite- and reanalysis-based datasets are employed as observational reference for the regression between radiative indices and climate sensitivities, resulting in an observationally constrained estimate of the latter. The likely range and best estimate of 2.9 - 4.0°C and 3.4°C is similar to previous estimates of climate sensitivity.

The emulation of the Bern2.5D climate model of intermediate complexity with an artificial neural network is described in Chapter 3, which allows a reduction in computational costs of about three orders of magnitude. Chapter 3 introduces the framework of statistical inference in which prior information about parameters of the Bern2.5D climate model are updated with a Markov Chain Monte Carlo (MCMC) algorithm. The MCMC algorithm is based on Bayes'

Theorem and allows to infer information about the model parameters from observations of past global temperature and ocean heat uptake changes. The neural network substitute of the climate model is implemented in the MCMC algorithm and significantly increases its efficiency. The notion of constraining projections of future temperature change based on a model's ability to reproduce past observations is tested with a cross-validation of the Bern2.5D model. Further, the 'perfect-model' method described in this Chapter is extended to a set of AOGCMs and it is shown that the temperature evolution during the 21st century of most AOGCMs can be well predicted with a climate model of lower complexity.

Chapter 4 examines the effect of discrepancies between different observational datasets of global temperature and ocean heat uptake change on the estimates of climate sensitivity and transient climate response. The primary source for the spread in these two quantities is likely due to differences in measurements of ocean heat uptake. The aggregation of probability density distributions derived with 12 combinations of observational datasets results in a likely range of 2.2 to 5.1°C for climate sensitivity with a mean estimate of 3.6°C. The distribution of the aggregated sensitivity estimates is found to be insensitive to a scaling of the annual observational error between -40% and +40%. Moreover, the choice of a different prior for climate sensitivity does not significantly change the likely range of the posterior climate sensitivity distribution. The estimates of decadal temperature increase during the years 2020-2029 and at the end of the 21st century are shown to be consistent with results presented in the Fourth Assessment Report (AR4) of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

The response of the climate system to changes in anthropogenic and natural forcing agents is driven by the total net radiative forcing, in which some of the positive and negative forcings partly offset each other. The attribution of different forcing species has been primarily assessed with optimal fingerprinting methods, which rely mostly on spatial-temporal warming patterns of natural and anthropogenic origin being different. Chapter 5 quantifies the contributions of individual forcing agents - including e.g. long-lived greenhouse gases, sulphates, tropospheric and stratospheric ozone as well as variations in solar irradiance and volcanic eruptions - to the total observed warming since the year 1850. The results are derived with the posterior parameters distributions of the Bern2.5D model presented in Chapter 4. The applied method makes few assumptions besides fundamental principles like the conservation of energy. We find that since the mid-20th century, greenhouse gases alone contributed 0.85°C with a 5-95% uncertainty of 0.6-1.1°C to the total observed change of about 0.56°C in global temperature. The observed trends are extremely unlikely (<5%) to be caused by internal variability even if current models were found to underestimate internal variability. Combining the results of Chapter 5 with estimates derived with optimal fingerprinting suggests an even higher confidence in anthropogenic causes dominating the observed warming of ocean and atmosphere.

# Zusammenfassung

Die Energiebilanz ist zentral für das Verständnis des Klimasystems auf der Erde und dessen Änderungen, die sowohl auf natürliche als auch auf anthropogene Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre zurückzuführen sind. Änderungen in der Energiebilanz wurden durch Beobachtungen und Modellsimulationen bestätigt. Das Konzept des Strahlungsantriebs wurde eingeführt, um die Änderungen der Energieströme an der oberen Grenze der Atmosphäre, die aufgrund von anthropogenen und natürlichen Treibern entstehen, zu quantifizieren. Die Energiebilanz basiert auf fundamentalen physikalischen Konzepten, so zum Beispiel auf der Energieerhaltung, und verbindet den Strahlungsantrieb mit Änderungen in der global gemittelten Temperatur und in der Wärmespeicherung der Ozeane mit der Gleichgewichts-Klimasensitivität. Letztere beschreibt die Temperaturänderung, bei der sich das Klimasystem nach einer instantanen Verdoppelung der vorindustriellen atmosphärischen Konzentration von Kohlendioxid stabilisiert. Die Klimasensitivität dominiert zusammen mit der Wärmespeicherung der Ozeane die langfristige Reaktion des Klimasystems auf Änderungen in der Energiebilanz.

Ziel der vorliegenden Studie ist das Verständnis davon, welche Einschränkungen die Energiebilanz und deren Änderungen auf Eigenschaften des Klimasystems wie die Klimasensitivität und auf modellbasierte Projektionen zukünftiger Temperaturänderungen bietet. Besonderes Augenmerk wird auf die Quantifizierung von Unsicherheiten gelegt, die sowohl Beobachtungen von klimatischen Größen als auch den Schätzungen der Klimasensitivität und Temperaturprojektionen eigen sind. Die Verwendung von Klimamodellen unterschiedlicher Komplexität erlaubt die Betrachtung von parametrischen und strukturellen Unsicherheiten. Die Substitution eines Klimamodells von mittlerer Komplexität mit einem künstlichen neuronalen Netzwerk spielt eine zentrale Rolle in dieser Studie.

Kapitel 2 betrachtet den mittleren Zustand der Energiebilanz und setzt Strahlungsindizes, die mit gekoppelten Atmosphäre–Ozean Zirkulations–Modellen (AOGCMs) berechnet wurden, in Zusammenhang mit den entsprechenden Klimasensitivitäten der Modelle. Diese Indizes wurden kürzlich verwendet, um die Variabilität und Änderungen in der globalen Temperatur zu beschreiben und basieren auf klimatischen Mustern wie dem Land–Ozean Kontrast, inter–hemisphärischen Unterschieden und der Stärke des Jahreszyklus<sup>7</sup>. Verschiedene Satelliten– und Reanalysen–Datensätze dienen als Referenzwerte in der Regression zwischen einem Strahlungsindex und der Klimasensitivität, wobei die Unsicherheit bei letzterer durch die Beobachtungen eingeschränkt werden kann. Die ”wahrscheinlichen” Werte der Klimasensitivität – definiert als die mittleren 66% einer statistischen Verteilung – liegen anhand dieser

Methode zwischen 2.9 – 4.0°C mit einer besten Schätzung von 3.4°C, die konsistent mit früheren Studien ist.

Die Emulation des Bern2.5D Klimamodells von mittlerer Komplexität mit einem neuronalen Netzwerk ist in Kapitel 3 beschrieben und erlaubt eine Reduktion der Rechenzeit eines Modelllaufes von ungefähr drei Größenordnungen. Kapitel 3 führt den Rahmen der statistischen Inferenz ein, in welchem vorgängige Information über Parameter des Bern2.5D Klimamodells mittels eines Markov Chain Monte Carlo Verfahrens (MCMC) aktualisiert werden kann. Der MCMC Algorithmus basiert auf Bayes' Theorem und erlaubt es, Informationen über Modellparameter von Beobachtungen vergangener Änderungen in der globalen Temperatur und Wärmespeicherung in den Ozeanen zu erhalten. Die Implementierung des neuronalen Netzwerkes im MCMC Verfahren verringert massgeblich die Rechenzeit des Verfahrens. Die Idee, die Unsicherheit in Projektionen zukünftiger Temperaturänderungen anhand der Fähigkeit eines Klimamodells, die Beobachtungen der globalen Temperatur und der Wärmeaufnahme in den Weltmeeren zu reproduzieren, zu beschränken, wird anhand einer Kreuz-Validierung mit dem Bern2.5D Klimamodell getestet. Dieser Ansatz eines "perfekten Modells" wird auf eine Gruppe von komplexeren Klimamodellen erweitert und es wird gezeigt, dass der Temperaturverlauf während des 21. Jahrhunderts für die meisten AOGCMs mittels eines weniger komplexen Modells vorhergesagt werden kann.

Kapitel 4 untersucht den Effekt von Diskrepanzen innerhalb von Beobachtungsdatensätzen der globalen Temperatur und ozeanischer Wärmespeicherung auf die Schätzungen der Klimasensitivität. Unterschiede in den Messungen der Wärmespeicherung sind wahrscheinlich der primäre Grund für die Spannweite innerhalb der Schätzungen der Klimasensitivität. Die Verknüpfung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen, die auf 12 Kombinationen von verschiedenen Beobachtungsdatensätzen basieren, resultiert in einer wahrscheinlichen Schätzung der Klimasensitivität zwischen 2.2°C und 5.1°C mit einer mittleren Schätzung von 3.6°C. Die Verteilung der zusammengefassten Schätzungen ist praktisch unabhängig von einer Skalierung des jährlichen Beobachtungsfehlers im Bereich zwischen -40% and +40%. Ferner wird gezeigt, dass die Wahl einer anderen a priori Verteilung der Klimasensitivität die Spannweite der Schätzungen nicht signifikant ändert. Die Schätzungen der dekadischen Temperaturzunahme zwischen 2020–2029 und gegen Ende des 21. Jahrhunderts sind konsistent mit den Werten des vierten Sachstandsbericht des Klimarates (IPCC AR4).

Die Antwort des Klimasystems auf Änderungen in anthropogenen und natürlichen Strahlungskomponenten basiert auf dem totalen netto Strahlungsantrieb, bei dem sich positive und negative Komponenten teilweise aufheben. Die Berechnung des Anteils verschiedener Strahlungskomponenten an der beobachteten Temperaturänderung basierte in der Vergangenheit in erster Linie auf der statistischen Methode des *optimal fingerprinting*, die stark auf der Annahme beruht, dass die zeitlichen und räumlichen Erwärmungsmuster natürlichen und anthropogenen Ursprungs verschieden sind. Kapitel 5 quantifiziert den Anteil individueller Strahlungskomponenten – z.B. langlebiger Treibhausgase, Sulphate, tropo- und stratosphärischem Ozon und Variationen der Sonneneinstrahlung und Vulkanausbrüche – an der total beobachteten Erwärmung seit dem Jahr 1850. Die Resultate gründen auf den Pa-

rameterverteilungen des Bern2.5D Klimamodells aus Kapitel 4. Die präsentierte Methode trifft wenige Annahmen nebst fundamentalen Prinzipien wie der Energieerhaltung. Es wird gezeigt, dass Treibhausgase allein seit der Mitte des 20. Jahrhunderts  $0.85^{\circ}\text{C}$  mit einer 5 – 95% Unsicherheit von  $0.6\text{--}1.1^{\circ}\text{C}$  zur beobachteten Erwärmung von etwa  $0.56^{\circ}\text{C}$  in der global gemittelten Temperatur beigetragen haben. Es ist extrem unwahrscheinlich ( $<5\%$ ), dass die beobachteten Trends nur auf interner Variabilität begründet sind, sogar wenn die aktuellen Klimamodelle diese unterschätzen. Die Kombination der Ergebnisse in Kapitel 5 mit Schätzungen anhand der *optimal fingerprinting* Methode deutet auf ein noch höheres Vertrauen hin, dass der menschliche Einfluss die beobachteten Erwärmung der Ozeane und Atmosphäre dominiert.