

Diss. ETH No. 17578

Surface Radiation Changes and their Impact on Climate in Central Europe

A dissertation submitted to
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
CHRISTIAN RUCKSTUHL

Dipl. Natw. ETH
Date of birth May 21, 1976
citizen of Udligenswil (LU)

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. A. Ohmura, examiner
PD Dr. R. Philipona, co-examiner
Prof. Dr. M. Kuhn, co-examiner
Prof. Dr. R. Knutti, co-examiner

2008

Abstract

The rapid temperature increase of 0.7°C averaged over the Northern Hemisphere and of 1°C over mainland Europe since 1980 is considerably larger than expected from anthropogenic greenhouse warming. The present thesis addresses questions like whether this rapid climate change is due to unexpected large greenhouse forcing that includes strong water vapor feedback or whether the temperature rise is strengthened by an increase in shortwave radiation fluxes observed since the mid-1980s.

Solar dimming, a decrease of solar radiation measured at the Earth's surface, has been observed during several decades before the 1980s. Since then a reversed trend with increasing solar radiation has been observed. Our investigations show that this solar brightening has apparently added to the temperature rise since the 1980s. The analyses give evidence for a substantial decline in aerosol concentrations over Europe, which has led to a significant increase of solar radiation reaching the ground. Aerosol optical depth (*AOD*) observations at six remote locations from the Baltic Sea to the Central Alps show a decrease in *AOD* by up to 63 percent from 1986 to 2005. Solar radiation, concurrently measured under cloud-free skies and averaged over eight German and twenty-five Swiss radiation stations below 1000 m a.s.l., shows a statistically significant increase of $+1.15$ [$+0.68$ to $+1.62$] $\text{Wm}^{-2} \text{dec}^{-1}$ between 1981 and 2005. Hence, the direct aerosol effect is clearly measured. On the other hand, all-sky solar radiation shows a statistically significant increase only due to the extraordinary year 2003, with its strongly reduced cloud amount. Without considering the year 2003, which has only a marginal impact on the temperature trends, the increase in solar radiation due to changes in clouds is $+0.78$ [-1.26 to $+2.82$] $\text{Wm}^{-2} \text{dec}^{-1}$. This shortwave cloud forcing is further reduced due to the counterbalancing longwave cloud effect. With respect to climate forcing on surface temperature, direct aerosol forcing is found to be about five times larger than the forcing due to changing clouds. First order estimates using mean climate sensitivity factors indicate, that with the observed strong aerosol decline the direct and the indirect aerosol and cloud forcing combined may have produced about one third of the recent rapid temperature increase observed in Central Europe since the 1980s.

The observed relation of decreasing *AOD* and consequently increasing solar radiation under cloud-free skies has been confirmed by MODTRAN (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model) calculations. MODTRAN calculations further indicate that the observed increase in water vapor has at least a five times smaller impact on solar irradiance transmission under cloud-free skies than the measured aerosol optical depth decline has.

For the conducted analysis of solar radiation under cloud-free skies, a new method has been developed to automatically detect cloud-free skies. The method is based on sunshine duration measurements and the variability of the atmospheric transmission derived from global solar irradiance measurements. This new method presents the advantage to use standard solar radiation parameters that are usually measured at advanced meteorological stations.

To validate state of the art radiometers a one year radiometer comparison campaign has been performed at the Payerne Baseline Surface Radiation Network (BSRN) site. The comparison has shown that state of the art Kipp & Zonen Pyranometers measure global solar irradiance within 1.6%, and if a field adjustment is performed the uncertainty even reduces to 1.0% on monthly means. If Eppley PSP Pyranometers are also considered, the uncertainties are about twice as large.

In order to explore the total surface radiation budget, a parameterization has been derived to estimate longwave downward radiation (*LDR*) from surface humidity and column integrated water vapor measurements. This *LDR*-parameterization will allow to investigate, besides the solar radiation trends, changes in longwave radiation fluxes, and hence the total surface radiation budget during periods, for which no accurate and continuous *LDR* measurement are available.

Zusammenfassung

Der rasante Temperaturanstieg seit 1980 von 0.7°C auf der Nordhemisphäre und von 1°C in Zentraleuropa ist bedeutend grösser als alleine vom anthropogenen Treibhauseffektanstieg erwartet werden kann. In dieser Arbeit wird den Fragen nachgegangen, ob dieser rasante Temperaturanstieg auf einen unerwartet starken Treibhauseffektanstieg, welcher durch eine starke Wasserdampfdruckkopplung verstärkt wird, zurückzuführen ist, oder ob der Temperaturanstieg vom beobachteten Anstieg der Globalstrahlung seit Mitte der 1980er Jahre beeinflusst und verstärkt ist.

Ein Rückgang der solaren Einstrahlung gemessen an der Erdoberfläche, das sogenannte “solar dimming”, wurde vor 1980 während mehreren Dekaden beobachtet. Seit Beginn der 1980er Jahre wird ein gegenläufiger Trend mit zunehmender solarer Einstrahlung beobachtet. Dieser Anstieg der Globalstrahlung, das “solar brightening”, hat offensichtlich zum Temperaturanstieg seit 1980 beigetragen. In dieser Arbeit wird gezeigt wie die Aerosolkonzentration über Europa markant zurückging, was einen Anstieg der Globalstrahlung verursachte. Messungen der Aerosol Optischen Dicke (*AOD*) an sechs Stationen vom Baltischen Meer bis hin zu den Alpen zeigen, dass die *AOD* von 1986 bis 2005 um bis zu 63 Prozent zurückgegangen ist. Gleichzeitig stieg die Globalstrahlung, welche unter wolkenfreien Bedingungen an acht Norddeutschen und an 25 Schweizer Stationen unter 1000 m.ü.M. gemessen wird, im Mittel deutlich an. Der statistisch signifikante Anstieg von 1981 bis 2005 beträgt $+1.15$ [$+0.68$ bis $+1.62$] $\text{Wm}^{-2} \text{dec}^{-1}$. Dieser Anstieg ist somit eine klare Folge des direkten Aerosoleffekts. Andererseits steigt die kontinuierlich gemessene Globalstrahlung nur infolge des aussergewöhnlichen Jahres 2003 mit statistischer Signifikanz an. Wird das Jahr 2003, welches nur einen sehr geringen Einfluss auf den Temperaturanstieg aufweist, nicht betrachtet, misst man einen Anstieg der Strahlung aufgrund der Wolken von $+0.78$ [-1.26 bis 2.82] $\text{Wm}^{-2} \text{dec}^{-1}$. Betrachtet man zusätzlich den langwelligen Wolkeneffekt, wird das kurzwellige Forcing weiter reduziert. In Bezug auf das Klima und die Temperatur hat somit das direkte Aerosolforcing einen etwa fünf mal stärkeren Einfluss als das Wolkenforcing. Abschätzungen erster Ordnung mit mittleren Klimasensitivitätsfaktoren ergeben, dass der direkte Aerosoleffekt und die indirekten Aerosol- und Wolkeneffekte zusammen etwa einen Drittel zum beobachteten Temperaturanstieg seit 1980 beigetragen haben können.

Die beobachtete Beziehung zwischen dem Rückgang der *AOD* und dem Anstieg der solaren Einstrahlung unter wolkenfreien Bedingungen wurde mit MODTRAN (MODerate spectral resolution atmospheric TRANsmittance algorithm and computer model) Rechnungen bestätigt. Zusätzlich zeigen MODTRAN Berechnungen, dass der beobachtete Anstieg des Wasserdampfes einen mindestens fünfmal geringeren Einfluss auf die Transmission der solaren Einstrahlung un-

ter wolkenfreien Bedingungen hat, als der Rückgang der *AOD*.

Für die ausgeführte Analyse der solaren Einstrahlung bei wolkenfreien Bedingungen wurde eine neue Methode entwickelt, um die wolkenfreien Momente automatisch zu erkennen. Die Methode beruht auf Sonnenscheindauer-Messungen und der Variabilität der atmosphärischen Transmission, welche von Globalstrahlungsmessungen abgeleitet wird. Diese neue Methode hat den Vorteil, dass nur Standard Strahlungsgrößen verwendet werden, welche normalerweise an erweiterten meteorologischen Stationen gemessen werden.

Zur Validierung von modernen Radiometern wurde an der Baseline Surface Radiation Network (BSRN) Station Payerne eine Einjahres Vergleichs-Messkampagne durchgeführt. Der Vergleich hat gezeigt, dass mit CM21 und CM22 Kipp & Zonen Pyranometern die Globalstrahlung auf 1.6% genau gemessen werden kann. Werden die Instrumente auf dem Messfeld gegeneinander abgeglichen, reduziert sich der auf das Monatsmittel bezogene Messfehler auf 1%. Werden auch die Eppley PSP Pyranometer betrachtet, erhöht sich die Unsicherheit auf ungefähr das Doppelte.

Um die gesamte Bodenstrahlungsbilanz weiter zu untersuchen, wurde eine Parametrisierung hergeleitet, mit welcher die langwellige Einstrahlung (*LDR*) von der spezifischen Feuchte und vom integrierten Wasserdampf abgeschätzt werden kann. Die *LDR*-Parametrisierung erlaubt es, nebst den kurzwelligen Strahlungstrends auch die Veränderung der langwelligen Strahlung seit Beginn der 1980er Jahre zu untersuchen als noch keine genauen und kontinuierlichen *LDR*-Messungen vorhanden waren.