

Heft 100 (2018) 18,90 Euro

promet

meteorologische fortbildung

Strahlungsbilanzen



M. WILD

6

Der Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche und dessen Veränderungen im globalen Klimawandel

Surface Radiation Budget and its variation under climate change

Zusammenfassung

In diesem Artikel wird die Bedeutung des Strahlungshaushalts an der Erdoberfläche als ein zentrales Element zum Verständnis des Klimasystems und des Klimawandels hervorgehoben. Der globale Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche ist weit weniger gut bekannt als am Atmosphärenoberrand, da er nicht direkt von Satelliten aus gemessen werden kann. Die vermehrte Verfügbarkeit von hochpräzisen Strahlungsmessstationen an der Erdoberfläche zusammen mit neuen Modellabschätzungen tragen aber dazu bei, die vorhandenen Unsicherheiten zu reduzieren. Die langen Messreihen der Strahlungsmessungen an den Bodenstationen erlauben zudem einen Einblick in die zeitlichen Veränderungen des Strahlungshaushalts. Dabei zeichnen sich nicht nur die erwartete Zunahme der atmosphärischen Gegenstrahlung mit zunehmendem Treibhauseffekt ab, sondern auch substantielle dekadische Schwankungen in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche („dimming/brightening“). Diese Veränderungen haben einen maßgeblichen Einfluss auf den Verlauf des Klimawandels.

Summary

This article highlights the importance of the radiation budget at the Earth's surface for the understanding of the genesis and evolution of climate change. The radiation budget at the Earth's surface is less well established than at the Top of Atmosphere, since it cannot be directly measured from satellites. The increasing availability of high quality radiation observations at the Earth's surface together with recent modelling approaches, however, allow to better constrain the surface radiation budget. The long term radiation observations further allow an insight into the temporal variations of the surface radiation budget. Thereby not only an increase in the thermal radiation emitted from the atmosphere towards the Earth's surface as expected from the increasing greenhouse effect becomes evident, but also substantial decadal variations in the solar radiation reaching the Earth's surface, known as “dimming” and “brightening”. These changes have a major influence on the evolution of global climate and ecosystems.

1 Einleitung

Der Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche ist von zentraler Bedeutung für das Ökosystem Erde. Er steuert zahlreiche Prozesse im globalen Klimasystem und schafft die energetischen und biologischen Voraussetzungen für alles Leben auf unserem Planeten. Veränderungen in den Strahlungsflüssen¹ an der Erdoberfläche haben deshalb unmittelbare Auswirkungen auf verschiedenste Umweltaspekte, wie zum Beispiel auf die globale Erwärmung, die Intensität des Wasserkreislaufs und Verfügbarkeit von Wasservorkommen, den Rückzug von Gletschern oder das Biosphärenwachstum und den Kohlenstoffkreislauf. Auf einer mehr anwendungsorientierten Ebene sind die Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche und deren Veränderungen auch wichtige Planungsgrößen in der Landwirtschaft, in der

Wasserwirtschaft und im schnell wachsenden Bereich der Solarenergiegewinnung. Aufgrund all dieser Aspekte ist eine verbesserte Kenntnis des Strahlungshaushalts an der Erdoberfläche von dringender Notwendigkeit.

2 Datengrundlagen

Aufzeichnungen von direkt gemessenen Strahlungsflüssen¹ an der Erdoberfläche reichen an vereinzelten Stationen zurück bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts, und beziehen sich vor allem auf die solare (kurzwellige) Einstrahlung¹ (auch Globalstrahlung genannt). Eine der längsten verfügbaren solaren Strahlungsmessreihen ist in Abbildung 6-1 dargestellt. Sie stammt von der Station Potsdam, die die solare Einstrahlung an der Erdoberfläche

¹ strahlungsbegrifflich eine Bestrahlungsstärke beziehungsweise Strahlungsflussdichte gemäß Kapitel „Strahlungsgrößen, -gesetze und -übertragung“

seit 1937 kontinuierlich misst. Eine verbesserte weltweite Abdeckung mit Strahlungsmessstationen wurde seit dem Internationalen Geophysikalischen Jahr (IGY) 1957/1958 erreicht. Viele dieser historischen Messreihen wurden im Globalen Energiebilanzarchiv (GEBA) (WILD et al. 2017) der ETH Zürich sowie im World Radiation Data Centre (WRDC) in St. Petersburg vereint. Der Fehler dieser Daten auf Jahresmittelbasis wurde in GILGEN et al. (1998) auf 2 % abgeschätzt. Die Qualität dieser historischen Messreihen ist allerdings uneinheitlich und nicht immer befriedigend. Rigorose Qualitätskontrollen und Homogenisierung gewisser Datenreihen sind deshalb unumgänglich, um unphysikalische Trends zu vermeiden (siehe zum Beispiel MANARA et al. 2016). In den späten 1980er-Jahren wurde deshalb die Notwendigkeit eines hochpräzisen Referenzstrahlungsmessnetzes mit gut charakterisierter Genauigkeit erkannt. Als Folge dessen wurden das Baseline Surface Radiation Network (BSRN), das Atmospheric Radiation Measurement Program (ARM) und das US-basierte Surface Radiation Network (SURFRAD) initiiert (OHMURA et al. 1998). Diese Messnetze erfassen die Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche mit bestmöglicher Genauigkeit und umfassen zurzeit zirka 60 Stationen weltweit (siehe Kapitel „Das Baseline Surface Radiation Network“).

Seit den frühen 1980er-Jahren können Strahlungsflüsse auch mittels Satelliten vom Weltraum aus abgeschätzt werden. Diese erlauben eine globale Abdeckung der Strahlungsbeobachtungen, was alleine vom Boden aus nicht erreicht werden kann, da hier große Lücken in den Messnetzen, zum Beispiel über den Ozeanen oder in entlegenen Landgebieten, bestehen. Im Vergleich zu den Strahlungsflüssen an der Atmosphärenobergrenze können die Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche vom Weltraum aus allerdings weniger gut abgeschätzt werden, da die von den Satellitensensoren empfangenen Signale von der dazwischenliegende Atmosphäre und der Erdoberfläche sowie deren Reflexionseigenschaften mitbeeinflusst werden. Die Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche müssen deshalb mittels empirischer oder physikalischer Modelle aus den Satellitenmessungen abgeleitet werden und benötigen für die Berechnungen zudem weitere Annahmen, wie zum Beispiel bezüglich der Art und Eigenschaften der in der Atmosphäre vorhandenen Aerosole, was zu Unsicherheiten in den berechneten Flüssen führt. Zudem leidet die Qualität der Satellitendaten auch unter den verschiedenlichen Wechseln der Satellitenplattformen, deren Sichtfeldern oder unter degradierenden Sensoren. Die Bodenstrahlungsflüsse aus Satellitenprodukten benötigen deshalb eine umfassende Validierung durch die oben erwähnten erdgebundenen Strahlungsmessnetze.

3 Der globale Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche

Dank umfassender Satellitenprogramme wie CERES (Clouds and the Earth's Radiant Energy) und SORCE (Solar Radiation and Climate Experiment) kennen wir den Energieaustausch zwischen Sonne, Erde und dem Weltraum, also die Nettostrahlungsflüsse am Oberrand der At-

mosphäre, mit hoher Genauigkeit im Bereich von wenigen W m^{-2} (LOEB et al. 2009). Die Strahlungsflüsse an der Erdoberfläche weisen dagegen weit höhere Unsicherheiten auf, wie im obigen Abschnitt ausgeführt. Dies zeigt sich in den verschiedenen publizierten globalen Energiebilanzdiagrammen, die in den Energieflüssen am Oberrand der Atmosphäre gut übereinstimmen, aber große Diskrepanzen in den Bodenflüssen zeigen. Unterschiede von 10 – 20 W m^{-2} in der global gemittelten solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche und der terrestrischen (langwelligen/thermischen) atmosphärischen Gegenstrahlung sind dabei keine Seltenheit. Selbst die neuste Generation von globalen Klimamodellen, die für den fünften IPCC Assessment Report verwendet wurden (IPCC 2013), zeigen bereits im globalen Mittel Unterschiede von 20 W m^{-2} sowohl in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche als auch in der atmosphärischen Gegenstrahlung (WILD et al. 2013). Gemittelt über die globalen Landmassen erreichen die Unterschiede sogar bis zu 30 – 40 W m^{-2} (WILD et al. 2015). Dies ist eine Folge der unterschiedlichen Repräsentation von Wolken, Aerosolen und Wasserdampf in den Modellen, wobei die Wolken den größten Einfluss haben.

Die zunehmende Anzahl von präzisen Strahlungsmessungen an der Erdoberfläche eröffnet neue Möglichkeiten, die Bodenstrahlungsflüsse aus den Satellitenprodukten und den Modellsimulationen besser einzugrenzen. Vergleiche mit diesen Referenzbodenmessungen haben ergeben, dass Modelle und Satellitenprodukte die solare Einstrahlung an der Erdoberfläche oft deutlich überschätzen, während sie die atmosphärische Gegenstrahlung oftmals unterschätzen (SANCHEZ-LORENZO et al. 2013a; WILD 2008 und darin enthaltene Referenzen; WILD et al. 2015). Neueste unabhängige Abschätzungen des globalen Bodenstrahlungshaushalts basierend auf Satellitenprodukten einerseits und bias-korrigierten Modellflüssen andererseits erreichen jedoch eine hohe Übereinstimmung und konvergieren zu einer global gemittelten solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche um die 185 W m^{-2} und einer atmosphärischen Gegenstrahlung von etwas über 340 W m^{-2} (L'ECUYER et al. 2015, WILD et al. 2015, siehe auch Abbildung 6-1). Unter der Annahme einer mittleren Bodenalbedo von 13,5 % ergibt sich damit eine solare Absorption von 160 W m^{-2} am Erdboden und 80 W m^{-2} in der Atmosphäre (Abbildung 6-1). Das bedeutet, dass zwei Drittel der insgesamt im Klimasystem absorbierten solaren Strahlung am Erdboden absorbiert wird, und ein Drittel in der Atmosphäre. Unter der Annahme einer terrestrischen Emission des Bodens von 398 W m^{-2} ergibt sich zusammen mit der atmosphärischen Gegenstrahlung eine terrestrische Strahlungsbilanz von etwa -56 W m^{-2} und eine Nettostrahlungsbilanz (solar und terrestrisch) im globalen Mittel von etwa 104 W m^{-2} (Abbildung 6-1). Dies ist die Strahlungsenergie, die im globalen Mittel den übrigen (Nichtstrahlungs-) Komponenten der Bodenenergiebilanz zur Verfügung steht. In erster Linie sind dies der latente Wärmefluss (das Energieäquivalent der Verdunstung) und zu einem kleineren Teil der sensible (fühlbare) Wärmefluss, während die Boden- und Schmelzflüs-

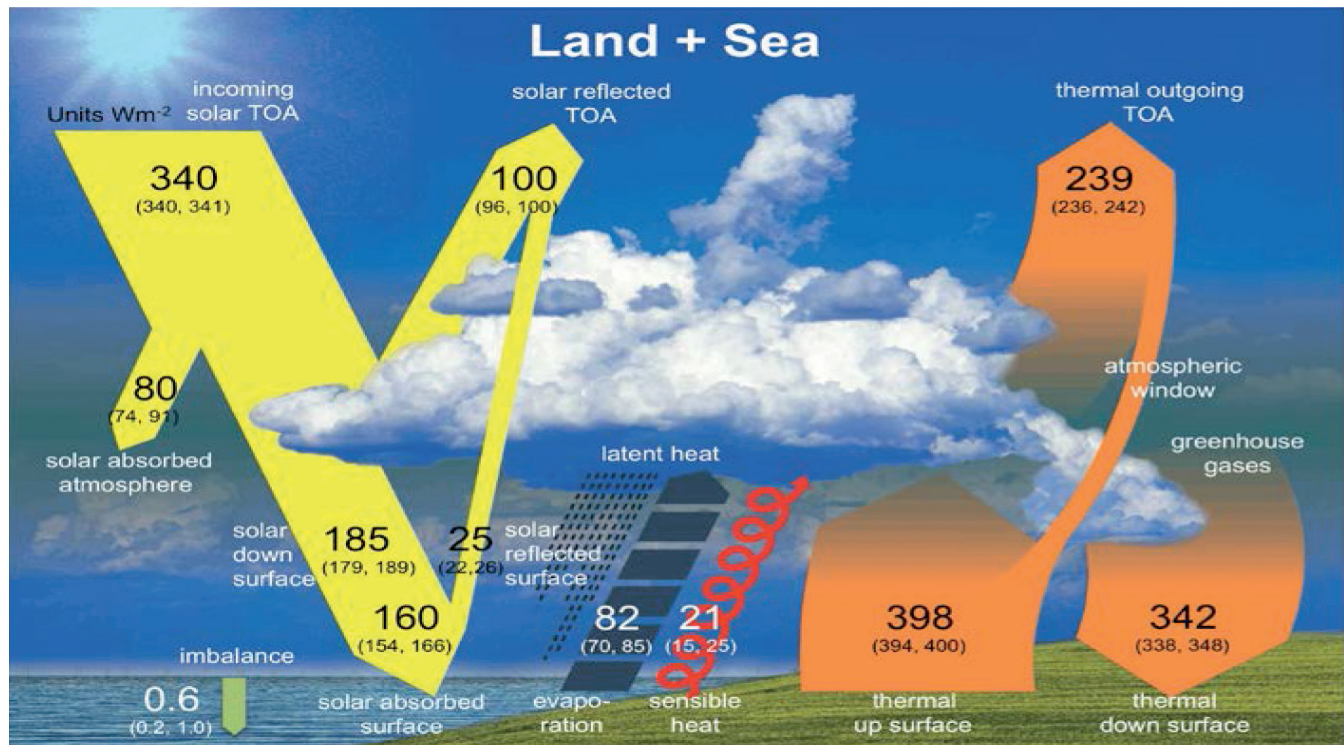


Abb. 6-1: Schematische Darstellung der globalen Energiebilanz der Erde. Die Zahlen beschreiben die Größenordnung der global gemittelten Energieflüsse in die durch die Pfeile vorgegebene Richtung (Einheit W m^{-2}). In Klammern ist der Unsicherheitsbereich angegeben. Die Darstellung beschreibt die Situation zu Beginn des 21. Jahrhunderts. Aus WILD et al. (2015).

se im langfristigen globalen Mittel vergleichsweise um mehr als eine Größenordnung kleiner sind (Abbildung 6-1). Da im globalen Mittel um die 80 % der verfügbaren Strahlungsenergie am Boden in den latenten Wärmefluss übergehen, also zur Verdunstung aufgewendet werden, und die Verdunstung im globalen Mittel dem Niederschlag entspricht, sind der Energie- und Wasserkreislauf eng miteinander verbunden. In den letzten Jahren wurde intensiv über mögliche Inkonsistenzen bei der Quantifizierung des Energie- und Wasserkreislauf debattiert, wonach die Bodenstrahlungsbilanz in vielen Satellitenprodukten zu hoch sei, was einen im Vergleich zu den globalen Niederschlagsmessungen übermäßig intensiven Wasserkreislauf zur Folge hätte (STEPHENS et al. 2012; TRENBERTH und FASULLO 2012; TRENBERTH et al. 2009; WILD 2012a). Die in Abbildung 6-1 gezeigten Werte ergeben in der Summe mit 104 W m^{-2} jedoch einen vergleichsweise niedrigen Wert für die Bodennettostrahlungsbilanz, was in besserer Übereinstimmung mit den Referenzstrahlungsmessungen steht. Dies induziert einen weniger intensiven Wasserkreislauf, der damit besser in Einklang mit den globalen Niederschlagsabschätzungen ist.

4 Dekadische Veränderungen in den Strahlungsflüssen an der Erdoberfläche

Für viele Fragestellungen benötigt man nicht nur Informationen über den mittleren Zustand des Strahlungshaushalts an der Erdoberfläche, sondern vor allem auch über dessen zeitliche Veränderung.

Eine für die Menschheit unmittelbar spürbare Konsequenz ihrer Eingriffe ins Klimasystem ist die daraus resultierende Veränderung in den solaren und terrestrischen Strahlungsflüssen, die an der Erdoberfläche auftreten. Als direkte Folge der zunehmenden Konzentration von anthropogenen Treibhausgasen in der Atmosphäre erhöht sich zum Beispiel die atmosphärische Gegenstrahlung von der Atmosphäre in Richtung Erdoberfläche. Andererseits modifiziert die Luftverschmutzung durch die dabei entstehenden strahlungsaktiven Aerosole die einfallende solare Einstrahlung direkt, oder indirekt durch eine Modifikation der Wolkeneigenschaften. Zudem können auch natürliche Vorgänge im Klimasystem, die zum Beispiel Veränderungen in der Bewölkung zur Folge haben, die Bodenstrahlungsflüsse beeinflussen.

4.1 Veränderungen in der atmosphärischen Gegenstrahlung

Die an der Erdoberfläche auftreffende atmosphärische Gegenstrahlung reagiert sehr sensitiv auf Änderungen der Treibhausgaskonzentration, der Temperatur und des Wasserdampfes der Atmosphäre. Sie ist eine kritische Größe in der Diskussion des anthropogenen Klimawandels, da sie direkt von Änderungen in der atmosphärischen Zusammensetzung beeinflusst wird, und den eigentlichen Treibhauseffekt an der Erdoberfläche repräsentiert. Im Vergleich zur solaren Einstrahlung wird die atmosphärische Gegenstrahlung an weitaus weniger Stationen gemessen, und auch die Messreihen sind kürzer. Erst seit den 1990er Jahren wird die atmosphärische Gegenstrahlung im Rahmen von BSRN an weltweit verteilten Stationen gemessen.

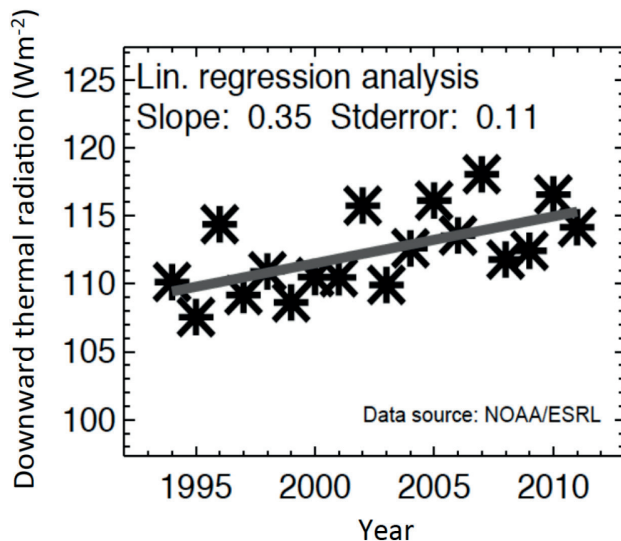


Abb. 6-2: Jahresmittlere atmosphärische Gegenstrahlung gemessen an der BSRN-Station am Südpol. Zudem ist eine lineare Regressionslinie dargestellt. Wie an der Mehrheit der BSRN-Station zeigt sich hier eine Zunahme der atmosphärischen Gegenstrahlung seit dem Messbeginn in den frühen 1990er Jahren. Einheit Wm^{-2} . Aus WILD 2016.

Als Illustration ist in Abbildung 6-2 die Messreihe der jahresmittleren atmosphärischen Gegenstrahlung an der Station Südpol gezeigt. Basierend auf einer ersten Auswertung der 12 längsten Messreihen von BSRN wurde von WILD et al. (2008) ein mittlerer Anstieg der atmosphärischen Gegenstrahlung von $2,6 \text{ W m}^{-2}/\text{Jahrzehnt}$ über die 1990er Jahre ermittelt. Eine aktuelle Aufbereitung dieser Analysen, die nun 25 BSRN-Stationen einbezog, ergab einen mittleren Anstieg von $2,0 \text{ W m}^{-2}$ pro Jahrzehnt seit den frühen 1990er Jahren, in quantitativer Übereinstimmung mit den Prognosen der neusten globalen Klimamodelle und den Erwartungen eines zunehmenden Treibhauseffektes (WILD 2016). Eine ähnliche Zunahme der atmosphärischen Gegenstrahlung wurde auch in den Schweizer Alpen von PHILIPONA et al. (2004) und WACKER et al. (2011) festgestellt. Der Anstieg der anthropogenen Treibhausgase führt also zu einem zusätzlichen Energieeintrag an der Erdoberfläche von etwa 2 W m^{-2} pro Jahrzehnt, mit entsprechenden Auswirkungen zum Beispiel auf die Bodentemperatur und die Verdunstung (WILD 2016).

4.2 Veränderungen in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche

Lange galt die stillschweigende Annahme, dass die Sonneneinstrahlung an der Erdoberfläche im Jahresmittel über die Zeit konstant ist. Erste Untersuchungen der langen Zeitreihen Ende der 1980er Jahre zeigten jedoch ein anderes Bild, nämlich dass sich die solare Einstrahlung an der Erdoberfläche seit den 1950er Jahren (das heißt seit Messbeginn) markant vermindert hat. Dies zeigten zunächst Untersuchungen an Stationen in Europa (OHMURA and LANG 1989) und bald auch an weltweit verteilten Stationen (STANHILL and MORESHET 1992). Viele nachfolgende Studien dokumentierten diese Abnahme der solaren Einstrahlung in verschiedenen Regionen der Erde (siehe WILD

2009 für einen Überblick). Dieses Phänomen wurde unter dem Begriff „global dimming“ populär (STANHILL and COHEN 2001). Als mögliche Erklärungen für die Abnahme der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche wurden der erhöhte Aerosolgehalt in der Atmosphäre aufgrund der zunehmenden Luftverschmutzung (STANHILL and COHEN 2001) sowie Veränderungen in der Beschaffenheit der Wolken (LIEPERT 2002) vorgeschlagen.

Neuere Untersuchungen mit aktualisierten Zeitreihen haben jedoch gezeigt, dass die Abnahme der solaren Einstrahlung sich nicht kontinuierlich fortgesetzt hat, sondern dass sich an vielen Stationen seit den 1980er Jahren eine Trendwende in Richtung einer zunehmenden Einstrahlung abzeichnete (WILD et al. 2005). Diese beobachtete Zunahme war in den 1990er Jahren besonders markant und wurde unter dem Begriff „global brightening“ populär (WILD et al. 2005). Dieser Anstieg wurde an verschiedenen BSRN Stationen auch unter wolkenfreien Bedingungen festgestellt, was auf eine Reduktion der Aerosolkonzentration in der Atmosphäre hindeutet (WILD et al. 2005). Diese Reduktion, welche die Atmosphäre für die Sonnenstrahlung wieder transparenter machte, wurde mit der Implementierung von Luftreinhaltemaßnahmen in Verbindung gebracht, die in den Industrienationen seit den 1980er Jahren erfolgreich umgesetzt wurden.

Die Abnahme der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche von den 1950er bis 1980er Jahren und die darauffolgende Zunahme ist auch in der langen Zeitreihe von Potsdam in Abbildung 6-3 ersichtlich. Zudem zeigt sich in dieser Abbildung auch eine Zunahme der Einstrahlung in den 1930er und 1940er Jahren, sowie eine gewisse Stabilisierung in den jüngsten Jahren. Diese dekadischen Variationen sind nicht nur in den Strahlungsmessreihen zu sehen, sondern auch in verwandten Klimaparametern, die zum Teil an viel mehr Orten und länger gemessen wurden, und sich daher als Proxydaten für die solare Einstrahlung an der Erdoberfläche eignen. Dazu gehört zum Beispiel die simple und robuste Messung der Sonnenscheindauer (SANCHEZ-LORENZO et al. 2013b), oder auch die Tagesamplitude der Temperatur, die ebenfalls eng mit der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche korreliert ist (MAKOWSKI et al. 2009). Auswertungen dieser Proxydaten stützen die These, dass das „Dimming und brightening“-Phänomen von großräumiger Natur ist (WILD 2009 und darin enthaltene Referenzen).

Die Frage in wieweit der Mensch, oder aber natürliche Veränderungen, zum Beispiel in der Bewölkung, für diese dekadischen Variationen in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche verantwortlich sind, ist noch nicht eindeutig geklärt. Der aktuelle Stand der Diskussion ist in WILD 2016 wiedergegeben.

4.3 Implikationen für den Klimawandel

Die in den zwei vorherigen Abschnitten diskutierten Veränderungen in den Strahlungsflüssen an der Erdoberfläche

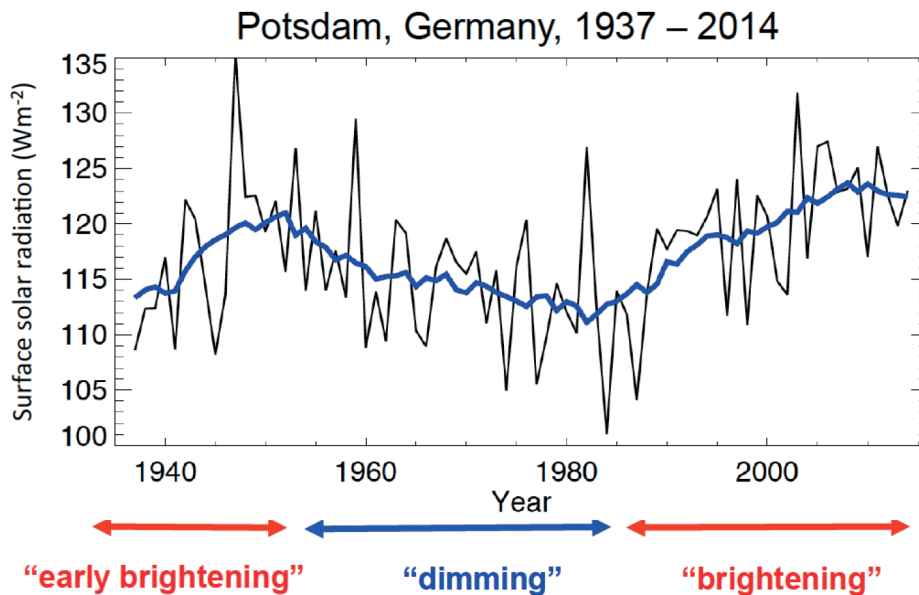


Abb. 6-3: Jahresmittlere solare Einstrahlung an der Erdoberfläche (in W m^{-2}) gemessen in Potsdam seit 1937. Ein gleitender Fünf-Jahres-Mittelwert ist in blau dargestellt. Deutliche Phasen mit einer Zunahme (1930er-1940er Jahre, „early brightening“), darauffolgender Abnahme (1950er-1980er Jahre, „dimming“) und erneuter Zunahme (seit den 1980er Jahren, „brightening“) sind ersichtlich. Zudem zeichnet sich auch eine Stabilisierung seit 2010 ab. Einheit W m^{-2} . Aus WILD (2016).

che haben markante Auswirkungen auf das Klimasystem und stellen wesentliche Faktoren des Klimawandels dar. Studien haben gezeigt, dass sowohl die Veränderungen in der atmosphärischen Gegenstrahlung als auch in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche die weltweite Temperaturentwicklung über die vergangenen Jahrzehnte maßgeblich geprägt haben. Während der zunehmende Treibhauseffekt und die damit verbundene Zunahme der atmosphärischen Gegenstrahlung für die langfristige Erwärmung seit der vorindustriellen Zeit verantwortlich sind, passen die Veränderungen in der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche gut zu den dekadischen Variationen der Erwärmungsraten. So hat sich während der „Dimming“-Periode von den 1950er bis zu den 1980er Jahren die Temperatur weltweit kaum erhöht, was gut zu der kühlenden Wirkung der abnehmenden solaren Einstrahlung passt, die die Treibhause Erwärmung in dieser Periode weitgehend kompensiert hat (WILD et al. 2007). Zu diesem Bild passt auch, dass in dieser Periode die weltweit über den Landoberflächen gemessenen Tagesmaximatemperaturen, die stark von der solaren Einstrahlung an der Erdoberfläche geprägt sind, sogar leicht abgenommen haben, während die Tagesminimatemperaturen, die mehr von der atmosphärischen Gegenstrahlung geprägt werden, zugenommen haben (WILD et al. 2007). Während der „Brightening“-Periode in den 1980er und 1990er Jahren wurden dagegen weltweit sehr hohe Erwärmungsraten gemessen. Dies passt zum Bild, dass in dieser Periode sowohl die solare Einstrahlung als auch die atmosphärische Gegenstrahlung zunahm, und dadurch in Kombination eine starke Erwärmung der Erdoberfläche verursacht haben. In dieser Periode findet sich im Gegensatz zur „Dimming“-Periode auch in den Tagesmaxima-Temperaturen eine starke Zunahme, was ebenfalls zur zunehmenden solaren Einstrahlung

lung in diesem Zeitraum passt (WILD et al. 2007). Das erneute Abklingen der Erwärmungsraten zu Beginn der Jahrtausendwende ist wiederum im Einklang mit der Abschwächung des „Brightening“ in diesem Zeitraum (WILD 2016).

Eine wichtige Rolle spielen die Veränderungen in den Bodenstrahlungsflüssen auch für den Wasserkreislauf, da sie die für die Verdunstung verfügbare Energie bereitstellen. Wie schon oben erwähnt, entspricht die Verdunstung im globalen Mittel dem Niederschlag. Entsprechend führen Änderungen in der für die Verdunstung verfügbaren Strahlungsenergie zu Änderungen im globalen Niederschlag, und damit zu Änderungen in der Intensität des globalen Wasserkreislaufs.

Untersuchungen haben gezeigt, dass während der „Dimming“-Periode die globalen terrestrischen Niederschläge abgenommen haben, im Einklang mit der abnehmenden Strahlungsenergie zum Antrieb des Wasserkreislaufs in diesem Zeitraum. In der „Brightening“-Periode, in der der Strahlungsantrieb des Wasserkreislaufs wieder stärker wurde, haben entsprechend auch die Niederschläge über den Landmassen insgesamt wieder zugenommen (WILD 2012b). Die beobachteten Veränderungen im Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche über die letzten Jahrzehnte scheinen also die Intensität des globalen Wasserkreislaufs maßgeblich mitgeprägt zu haben.

Auch Veränderungen in der Kryosphäre scheinen von den Veränderungen des Bodenstrahlungshaushalts beeinflusst zu sein. So hat sich die Ausdehnung der Schneedecke in der Nordhemisphäre sowie vieler Gebirgsgletscher während der „Dimming“-Periode der 1950er bis 1980er Jahre kaum verändert. Die Flächenreduktion hat erst mit der darauffolgenden „Brightening“-Periode und der damit erhöhten Energiezufuhr für die Schmelze merklich eingesetzt (OHMURA et al. 2007, PAUL et al. 2004, WILD 2009).

Aber nicht nur quantitative, sondern auch qualitative Veränderungen in den Bodenstrahlungsflüssen können von Bedeutung sein. Für das Wachstum der Biosphäre zum Beispiel ist der quantitative Anteil der diffusen Strahlung am Sonnenlicht entscheidend. Diffuse Strahlung kann nämlich tiefer in die Vegetationsschichten eindringen als die Direktstrahlung, die nur die äußersten Vegetationsschichten erreicht. Damit kann diffuse Strahlung von den Pflanzen viel effektiver als direkte Strahlung für die Photosynthese genutzt werden. Mit zunehmenden Aerosolen

und/oder Wolken hat während der „Dimming“-Periode der diffuse Anteil stetig zugenommen, während die totale solare Einstrahlung abgenommen hat. Dies hat gegenteilige Auswirkungen auf die Photosynthese. Modellstudien deuten darauf hin, dass während der „Dimming“-Periode der Effekt der zunehmenden Diffusstrahlung gegenüber der abnehmenden Totalstrahlung überwogen hat, und deshalb die Photosynthese und die damit verbundene Kohlenstoffaufnahme und das Biosphärenwachstum sich in diesem Zeitraum verstärkt haben (MERCADO et al. 2009).

Die Veränderungen im Strahlungshaushalt am Erdboden scheinen also wesentliche Auswirkungen auf eine ganze Reihe von fundamentalen Umweltprozessen zu haben, die wiederum den Strahlungshaushalt beeinflussen können.

5 Schlussfolgerungen

Der Strahlungshaushalt an der Erdoberfläche ist von eminenter Wichtigkeit für das Klimasystem und steuert eine Reihe wesentlicher Klimaprozesse. Während die weltweite Verteilung der Strahlungsflüsse am Oberrand der Atmosphäre von den Satelliten aus relativ genau bestimmt werden kann, ist diese an der Erdoberfläche mit weit größeren Unsicherheiten behaftet. Bodenbasierte Referenzstationen, zum Beispiel vom BSRN Netzwerk, können entscheidend dazu beitragen, diese Unsicherheiten zu reduzieren. Es ist daher von großer Wichtigkeit, dass die Bodenstrahlungsnetze auch in Zukunft weiterhin gesichert sind, und nach Möglichkeit weiter ausgebaut werden können, vor allem auch in Gebiete hinein, in denen bisher kaum Messstationen bestehen, zum Beispiel in entlegenen Landgebieten, über Ozeanen, oder polaren Gebieten. Die langjährigen Messreihen der Bodenstationen sind es auch, die die Entdeckung ermöglicht haben, dass nicht nur die atmosphärische Gegenstrahlung zunimmt, wie wir es bei einem zunehmenden Treibhauseffekt auch erwarten, sondern dass auch die solare Einstrahlung an der Erdoberfläche starke dekadische Schwankungen aufweist, die den Klimawandel ebenfalls stark beeinflussen.

Danksagungen

Ich möchte Prof. Christoph Schär, Prof. Atsumu Ohmura und Dr. Doris Folini für die langjährige Unterstützung meiner Arbeiten danken. Barbara Schär hat das globale Energiebilanzdiagramm gestaltet.

Literatur

- GILGEN, H., WILD, M., OHMURA, A., 1998: Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *Journal of Climate* **11**, 2042-2061.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1535 pp.
- L'ECUYER, T.S., and Coauthors, 2015: The Observed State of the Energy Budget in the Early Twenty-First Century. *Journal of Climate* **28**, 8319-8346.
- LIEPERT, B.G., 2002: Observed reductions of surface solar radiation at sites in the United States and worldwide from 1961 to 1990. *Geophysical Research Letters* **29**, 1421.
- LOEB, N.G., and Coauthors, 2009: Toward Optimal Closure of the Earth's Top-of-Atmosphere Radiation Budget. *Journal of Climate* **22**, 748-766.
- MAKOWSKI, K., JAEGER, E.B., CHIACCHIO, M., WILD, M., EWEN, T., OHMURA, A., 2009: On the relationship between diurnal temperature range and surface solar radiation in Europe. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **114**, D00d07.
- MANARA, V., BRUNETTI, M., CELOZZI, A., MAUGERI, M., SANCHEZ-LORENZO, A., WILD, M., 2016: Detection of dimming/brightening in Italy from homogenized all-sky and clear-sky surface solar radiation records and underlying causes (1959-2013). *Atmospheric Chemistry and Physics* **16**, 11145-11161.
- MERCADO, L. M., BELLOUIN, N., SITCH, S., BOUCHER, O., HUNTINGFORD, C., WILD, M., COX, P.M., 2009: Impact of changes in diffuse radiation on the global land carbon sink. *Nature* **458**, 1014-1018.
- OHMURA, A., LANG, H., 1989: Secular variations of global radiation in Europe. IRS '88: Current Problems in Atmospheric Radiation, J. Leonoble, and Geleyn, J.F., Eds. A. Deepak Publ., 98-301.
- OHMURA, A., BAUDER, A., MÜLLER, H., KAPPENBERGER, G., 2007: Long-term change of mass balance and the role of radiation. *Annals of Glaciology* **46**, 367-374.
- OHMURA, A., and Coauthors, 1998: Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRP): New precision radiometry for climate research. *Bulletin of the American Meteorological Society* **79**, 2115-2136.
- PAUL, F., KÄÄB, A., MAISCH, M., KELLENBERGER, T., HAEBERLI, W., 2004: Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophysical Research Letters* **31**, Art. L21402.
- PHILIPONA, R., DÜRR, B., MARTY, C., OHMURA, A., WILD, M., 2004: Radiative forcing - measured at Earth's surface - corroborates the increasing greenhouse effect. *Geophysical Research Letters* **31**, L03202.
- SANCHEZ-LORENZO, A., TRENTMANN, J., WILD, M., 2013a: Validation of Monthly Surface Solar Radiation over Europe Derived from the CM SAF Dataset against Homogenized GEBA Series (1983-2005). *Aip. Conf. Proc.* **1531**, 432-435.
- SANCHEZ-LORENZO, A., CALBO, J., WILD, M., AZORIN-MOLINA, A., SANCHEZ-ROMERO, A., 2013b: New insights into the history of the Campbell-Stokes sunshine recorder. *Weather* **68**, 327-331.
- STANHILL, G., MORESHET, S., 1992: Global Radiation Climate Changes - the World Network. *Climatic Change* **21**, 57-75.

- STANHILL, G., COHEN, S., 2001: Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology* **107**, 255-278.
- STEPHENS, G.L., and Coauthors, 2012: An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience* **5**, 691-696.
- TRENBERTH, K. E., FASULLO, J.T., 2012: Tracking Earth's Energy: From El Nio to Global Warming. *Surv Geophys* **33**, 413-426.
- TRENBERTH, K. E., FASULLO, J.T., KIEHL, J., 2009: Earth's Global Energy Budget. *Bulletin of the American Meteorological Society* **90**, 311.
- WACKER, S., GRÖBNER, J., HOCKE, K., KÄMPFER, N., VUILLEUMIER, L., 2011: Trend analysis of surface cloud-free downwelling long-wave radiation from four Swiss sites. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, **116**.
- WILD, M., 2008: Short-wave and long-wave surface radiation budgets in GCMs: a review based on the IPCC-AR4/CMIP3 models. *Tellus A* **60**, 932-945.
- WILD, M., 2009: Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **114**, D00d16.
- WILD, M., 2012a: New Directions: A facelift for the picture of the global energy balance. *Atmos Environ* **55**, 366-367.
- WILD, M., 2012b: Enlightening Global Dimming and Brightening. *Bulletin of the American Meteorological Society* **93**, 27-37.
- WILD, M., 2016: Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *Wires Clim Change* **7**, 91-107.
- WILD, M., OHMURA, A., MAKOWSKI, K., 2007: Impact of global dimming and brightening on global warming. *Geophysical Research Letters* **34**, L04702.
- WILD, M., GRIESER, J., SCHAER, C., 2008: Combined surface solar brightening and increasing greenhouse effect support recent intensification of the global land-based hydrological cycle. *Geophysical Research Letters* **35**, L17706.
- WILD, M., FOLINI, D., SCHAER, C., LOEB, N., DUTTON, E.G., KÖNIG-LANGLO, G., 2013: The global energy balance from a surface perspective. *Climate Dynamics* **40**, 3107-3134.
- WILD, M., OHMURA, A., SCHÄR, C., MÜLLER, G., FOLINI, D., SCHWARZ, M., HAKUBA, M. Z., AND SANCHEZ-LORENZO, A., 2017: The Global Energy Balance Archive (GEBA) version 2017: a database for worldwide measured surface energy fluxes, *Earth Syst. Sci. Data*, **9**, 601-613, <https://doi.org/10.5194/essd-9-601-2017>, 2017.
- WILD, M., and Coauthors, 2005: From dimming to brightening: Decadal changes in solar radiation at Earth's surface. *Science* **308**, 847-850.
- WILD, M., and Coauthors, 2015: The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Climate Dynamics* **44**, 3393-3429.

PROF. DR. MARTIN WILD
ETH Zürich
Institut für Atmosphäre und Klima
8092 Zürich
Schweiz
martin.wild@env.ethz.ch