

1 Einleitung

Ein Phänomen des 20. Jahrhunderts ist die Fähigkeit des Menschen, nicht nur seine nahe Umgebung zu prägen, sondern weltweit Einfluss zu nehmen. Mit dem Anfang der Industrialisierung begann die Wahrnehmung der schnellen Verschmutzung der Atmosphäre und deren Konsequenzen. Aufgrund der menschlichen Tätigkeit, vor allem durch Verbrennung fossiler Brennstoffe sowie durch landwirtschaftliche und industrielle Tätigkeiten, hat sich die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre verändert. Dies hat einen entscheidenden Einfluss auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre. Messungen des Strahlungsaustausches zwischen dem Planeten Erde und seiner Umwelt sind ein grundlegender Beitrag zum Verständnis des Wetters und des Klimas der Erde.

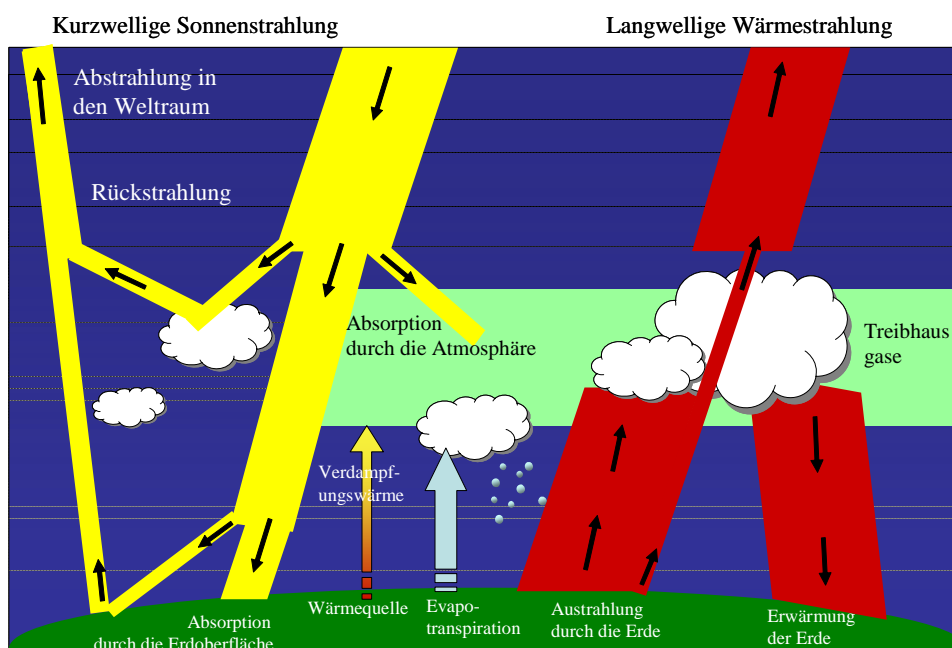


Abb. 1.1: Strahlungsbilanz: Die Sonnenenergie erreicht die Erde als kurzwellige Strahlung, die teilweise durch die Wolken und die Erdoberfläche wieder in das Weltall reflektiert wird. Der restliche Teil wird durch die Atmosphäre und Erdoberfläche absorbiert. Die erwärmte Erdoberfläche strahlt diese Energie als Wärmestrahlung (langwellige Strahlung) aus, die in der Atmosphäre zum Teil durch die Treibhausgase absorbiert und partiell zurück zur Erdatmosphäre gestrahlt wird (Gegenstrahlung). Abbildung nach Lozan (1998)

Die Strahlungsbilanz oder das Gleichgewicht des Erde-Atmosphäre-Ozean Systems wird zum einen durch die einfallende Sonnenstrahlung und zum anderen durch die von der Erdoberfläche in den Weltraum ausgehende terrestrische Strahlung bestimmt (siehe Abb. 1.1).

Mit einem globalen Bedeckungsgrad von etwa 60% beeinflussen Wolken maßgeblich die Strahlungsbilanz. Sie haben einen entscheidenden Einfluss sowohl auf die kurzwelligen als auch auf die langwelligen Strahlungsprozesse und besitzen in Abhängigkeit von ihrer Höhe und dem Wolkentyp sehr unterschiedliche Eigenschaften in Bezug auf die Reflexion und Absorption der Strahlung. Zwei Eigenschaften spielen hierbei eine wesentliche Rolle: Hohe dünne Wolken lassen die kurzwellige Einstrahlung gut passieren und weisen wegen ihrer niedrigen Temperatur nur geringe langwellige Abstrahlung in den Weltraum auf. Aufgrund dieser beiden Effekte fördern sie eine Erwärmung. Mittelhohe und tiefe Wolken besitzen dagegen eine hohe Rückstreuung (Albedo) im solaren Spektralbereich sowie eine höhere langwellige Ausstrahlung aufgrund der höheren Temperatur und bewirken deshalb eine Abkühlung. Weil im globalen Mittel die Wolken die Sonnenstrahlung stärker zurückstreuen als sie die Abstrahlung der Erde in den Weltraum behindern, wird im Mittel eine abkühlende Wirkung der Wolken für die Erdoberfläche gemessen (IPCC, 2001). Eine zentrale Frage lautet: Wird die kühlende Wirkung bei erhöhtem Treibhauseffekt verstärkt oder vermindert (Grassl, 1998)?

Modellsimulationen mit einer Verdopplung des CO_2 -Treibhausgases zeigen große Schwankungen bezüglich des Netto Strahlungsantrieb der Wolken, kurzwellig oder langwellig, im Bereich von $\pm 3 \text{ Wm}^{-2}$ (Siehe Abb. 1.2). Der Anstieg des CO_2 -Gehalts hat in manchen Simulationen eine negative in andere eine positive Wirkung auf den Strahlungsantrieb der Wolken. Zudem variieren die Amplituden der kurzwelligen und langwelligen Strahlung signifikant.

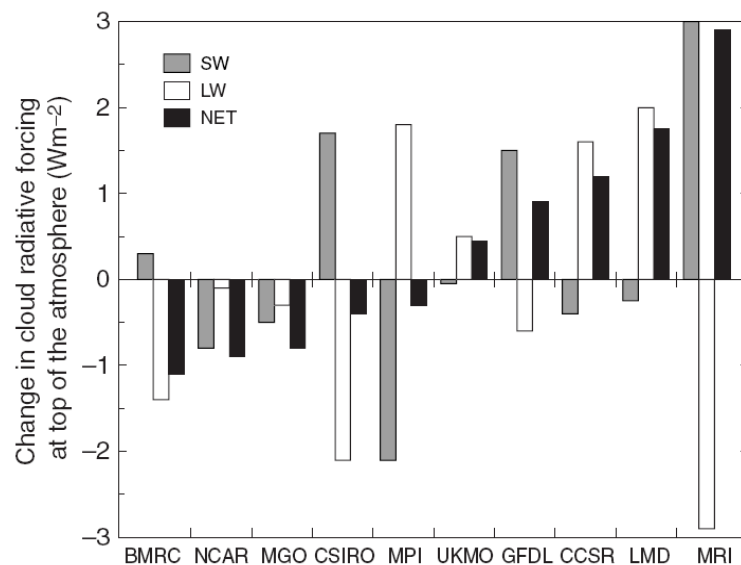


Abb. 1.2: Änderung des Strahlungsantriebs der Wolken am Oberrand der Atmosphäre (CRF, Cloud Radiativ Forcing) verbunden mit einer CO₂-Verdoppelung. Das Vorzeichen ist positiv, wenn der CRF ansteigt (von heute zu doppelten CO₂-Gehalt) dies führt zu einer Erwärmung, negatives Vorzeichen führt zu einer Abkühlung. Atmosphären-Modelle der folgenden Institute: BMRC - Bureau of Meteorology Research Center (Australien); NCAR - National Center for Atmospheric Research (USA); CSIRO - Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (Australien); MPI - Max Planck Institut für Meteorologie; UKMO Modell des Hadley Centers (UK); GFDL - Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA); CCSR - Center for Climate System Research (Japan); LMD - Laboratoire de Météorologie Dynamique (Frankreich); MRI - Meteorological Research Institute (Japan); MGO - Main Geophysical Observatory (Russland); aus dem IPCC (2001).

Um sich dem Verständnis des komplexen Systems von Rückkopplungsmechanismen zwischen Wolken und Klima zu nähern, ist es notwendig, genaue Kenntnisse der Strahlungsflüsse über und unter den Wolken zu gewinnen. Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, die Größe des rückgestrahlten Sonnenlichtes über den Wolken und die an der Erdoberfläche ankommende solare Strahlung mittels satellitengestützter Messungen zu quantifizieren.

Historischer Abriss

Der derzeitige Kenntnisstand der Strahlungsbilanz der Erde ist eng an die Entwicklung der Satelliten- und Sensortechnik gekoppelt. Die ersten Messungen des Strahlungsflusses am Oberrand der Atmosphäre sind durch Satellitenmessungen möglich geworden. Der erste Satellit, SPUTNIK 1 (1957), setzte einen Startschuss für eine rasante Entwicklung der Atmosphärenforschung. Neben synoptischen Anwendungen waren Abschätzungen der Strahlungsbilanz von Beginn an ein Hauptthema der Wissenschaftler.

So konnten mit den Satelliten der 1. Generation (z.B. Explorer 7 (1959), TIROS 7 (1963)) nur kurzfristige Messungen von wenigen Monaten durchgeführt werden, da eine Reihe technischer Probleme und eine geringe Überflughöhe Grenzen setzten. Trotzdem war es möglich erste globale Albedokarten zu erstellen, da auf den TIROS Satelliten eine breitbandige kurzwellige Rückstrahlung ($0,2\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$) gemessen wurde (House *et al.*, 1986).

Die verbesserten Trägerraketen der 2. Generation waren in der Lage, Satelliten in sonnen-synchrone Umlaufbahnen zu schicken. Damit war eine globale Überdeckung möglich. Die Sensoren auf den Nimbus 2 und 3 Satelliten konnten in vier spektral schmalbandigen Kanälen messen (solaren und langwelligen). Zum ersten Mal wurden die schmalbandigen Kanäle benutzt, um einen breitbandigen Strahlungsfluss abzuschätzen. Diese Methode erforderte eine Reihe von *a-priori* Annahmen (z.B. Unabhängigkeit vom Sonnenzenit, Isotrope Reflexion, Raschke *et al.*, 1973).

Die 3. Generation (z.B. Nimbus 6 und 7, 1975) war dadurch gekennzeichnet, dass alle drei Komponenten des Strahlungsflusses auf einem Satelliten gleichzeitig gemessen werden konnten: direkte solare Strahlungsstärke, reflektierte kurzwellige Strahlung und ausgestrahlte langwellige Strahlung. Die benutzten *Earth Radiation Budget*-Instrumente (Smith *et al.*, 1977) besaßen spektral breitbandige Kanäle und konnten gleichzeitig in verschiedenen Richtungen beobachten. Damit war es möglich, Anisotropiefunktionen für verschiedene Szenen der bewölkten Atmosphäre sowie des Untergrundes bei wolkenfreier Atmosphäre vom Satelliten aus zu messen. Zusätzlich wurde die Solarkonstante zum ersten Mal über einen längeren Zeitraum bestimmt (Hickey *et al.*, 1984).

Der nächste Schritt bestand darin, mehrere Satelliten mit den gleichen Instrumenten zu bestücken, um mehr Überflüge am Tag zu erhalten. Mit dem „*Earth Radiation Budget Experiment*“ (ERBE, Barkstrom *et al.*, 1986) wurde der Übergang von der einzelnen Strahlungsmessung zu einem synergetischen Produkt aus mehreren Strahlungsmessungen auf verschiedenen Instrumenten geschaffen. ERBE bestand aus drei Satelliten mit jeweils vier nicht abtastenden Radiometern und drei abtastenden Radiometern. Hiermit wurden

erstmalig tägliche Schwankungen des Strahlungsflusses ausgewertet und eine Klimatologie der Strahlungsbilanz erstellt.

Weiterführend wurden in den 90er Jahren eine Reihe von Satelliten (TRMM, TERRA, AQUA) mit dem Instrument CERES (*Clouds and the Earth's Radiant Energy System*, Wielicki *et al.*, 1995) in die Erdumlaufbahn geschossen, mit dem Ziel, die Wolken-Strahlungs-Wechselwirkung des Klimasystems der Erde zu untersuchen. CERES ist eine Weiterentwicklung der ERBE-Instrumente. Die CERES-Instrumente führen damit die bestehende 13jährige Klimatologie der ERBE-Messungen für den kurzwelligigen Strahlungsfluss und den langwelligigen Strahlungsfluss fort.

Motivation

Im Rahmen des globalen Energie- und Wasser-Kreislauf-Experiments (GEWEX) und in dessen kontinentalem Subexperiment BALTEX wird der Aspekt der Validierung von regionalen Modellen in den Vordergrund gestellt (Raschke *et al.*, 1998). Regionale Modelle werden immer häufiger benutzt, um Aussagen über die Klimaänderung in verschiedenen Regionen zu treffen. Sie können durch ihre erhöhte räumliche Auflösung geografische Details, wie z.B. den Harz in Deutschland, ausreichend darstellen. Hierbei nutzen die regionalen Modelle die Ergebnisse von globalen Modellen, indem sie an den Rändern die Bedingungen von dem größeren Modell vorgeschrieben bekommen.

Es ist in jedem Fall erforderlich, die Ergebnisse der Modellrechnungen mit Beobachtungen zu vergleichen, um die Genauigkeit der regionalen Modelle abzuschätzen. Dazu sind Satellitenmessungen mit einer räumlichen Auflösung in regionalen Längenskalen nötig.

Die räumliche Auflösung der CERES-Instrumente hat sich von ca. 100km der ERB-Instrumente auf ca. 20km verbessert. Allerdings ist die räumliche Auflösung dabei noch immer zu gering, um Wolken genügend beschreiben zu können. Hierzu eignen sich die spektral schmalbandig messenden Satelliteninstrumente, z.B. das MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), die eine räumliche Auflösung von 1km im Nadir besitzen. Die spektral hochaufgelösten Messungen geben Informationen zur Absorption der atmosphärischen Gase, zum spektralen Verlauf der Oberflächentypen und zu den mikrophysikalischen Eigenschaften der Wolken. Unter Nutzung dieser Eigenschaften wurde ein Fernerkundungsverfahren zur Bestimmung des kurzwelligigen Strahlungsflusses aus MODIS-Messungen entwickelt.

Ziel der hier vorgestellten Arbeit ist es, aus einigen schmalbandigen Kanälen des MODIS-Sensors das breitbandige solare Rückstreuverhalten von Wolken zu ermitteln und damit einen Beitrag zur Verifizierung von hochaufgelösten regionalen Modellen zu leisten.

Damit ist es dann möglich, das Rückstreuverhalten der Wolken in der Auflösung des MODIS von 1km im Nadir zu analysieren. Ein Hauptaugenmerk wurde auf Wolken über dem Ozean mit verschiedener Aerosolkonzentration gelegt, im Besonderen auf die Änderung der Strahlungseigenschaften bei kontinentalem Luftmasseneinfluss. Hierzu wurden zwei Fallstudien herangezogen. Die betrachteten Wolkenfelder setzen sich aus einerseits maritim geprägten Wolken und andererseits kontinental geprägten Wolken zusammen. Der Vergleich zwischen diesen liefert Aufschluss über die Unterschiede ihrer Rückstreuverhalten.

Aufbau der Arbeit

Die Arbeit wurde in drei Hauptteile gegliedert.

Zunächst wird als Grundlage der Strahlungstransport durch die bewölkte Atmosphäre unter verschiedenen Aspekten beschrieben (Kap. 2).

Im zweiten Teil wird das Verfahren zum Ableiten des räumlich hochaufgelösten aufwärtsgerichteten solaren Strahlungsflusses entwickelt und ausführlich dargestellt (Kap. 3). Weiterführend wird der Vergleich mit den CERES-Messungen vorgestellt (Kap. 4).

Im dritten Teil wird die Anwendung dieses neuen Verfahrens auf MODIS-Messungen zur Untersuchung von Fallstudien und zum Vergleich mit einem regionalen Klimamodell erläutert (Kap. 5, Kap. 6).