

### 3.6 Anmerkungen über die Eiswolken und ihre Bedeutung

MARKUS QUANTE

**Anmerkungen über die Eiswolken und ihre Bedeutung:** Im Erdsystem ist die Eisphase auch in der Atmosphäre präsent, das allerdings in vergleichsweise kleinen Mengen. Die Cirruswolken der oberen Troposphäre bestehen fast ausschließlich aus Eiskristallen. Diese Wolken treten über vielen Regionen der Erde auf, ihr globaler Bedeckungsgrad variiert zwischen 20 und 30%. Aufgrund der geringen Albedo auf der einen Seite und der Fähigkeit, langwellige Strahlung zu absorbieren, zusammen mit einer temperaturbedingten geringen Emission auf der anderen Seite zeigen Cirruswolken netto einen nicht unerheblichen Erwärmungseffekt im Klimasystem. Als Eiskristallquelle können Cirren die Niederschlagsbildung in tieferen Wolken beeinflussen und somit den Wasserhaushalt und damit das Klima modifizieren. Auch in den Mischphasenwolken spielt das Eis eine bedeutende Rolle insbesondere bei der Bildung von Starkniederschlägen. Eis in der Atmosphäre ist relevant für das Klima unseres Planeten.

**Annotations on ice clouds and their relevance:** In the Earth system the solid phase of water is also present in the atmosphere, albeit in relatively small amounts. The cirrus clouds of the upper troposphere consist exclusively of ice particles. These clouds appear above many regions of the Earth, their global coverage varies between 20 and 30%. Due to a low albedo on the one hand and the ability to absorb longwave radiation together with an emission at low temperatures on the other hand cirrus clouds reveal a considerable net warming effect in the climate system. As a source of ice particles cirrus clouds may influence the formation of rain in lower clouds and by this modify the water budget and thus the climate. In addition ice plays a role in mixed phase clouds during the formation of especially strong precipitation events. Atmospheric ice is relevant for the climate of our planet.

#### Einführung - Eis in der Atmosphäre

Wasser ist in der Atmosphäre in allen drei Phasen präsent, aufgrund der vorherrschenden Temperaturprofile kommt es fast ausschließlich, aber nicht nur, in der Troposphäre vor. Ein allerdings sehr geringer Anteil befindet sich auch in der Stratosphäre und in der Mesosphäre. Das Volumen von 12,9 Tausend Kubikkilometer, würde aller Wasserdampf in der Atmosphäre kondensiert, entspricht lediglich in etwa 0.001% des Weltwasservorkommens. In der Atmosphäre tritt Wasser hauptsächlich in Form von Wasserdampf in Erscheinung (kondensiert ergäbe das eine Wassersäule von 25 mm

Höhe), nur der geringe Anteil von 0,25 bis 0,3% ist in flüssiger oder fester Form in Wolken anzutreffen (also nur 0,06-0,08 mm Wassersäule) (QUANTE & MATTHIAS 2006). Der deutlich kleinere Teil davon ist als Eis anzutreffen, es handelt sich dabei im Vergleich zum Eis an Land und auf dem Meer um eine verschwindend kleine Menge. Eis kommt in den Cirruswolken der oberen Troposphäre vor, die nur aus Eisparkeln, meist Kristallen, bestehen, ist aber auch in den weit verbreiteten Mischphasenwolken anzutreffen, und dort häufig entscheidend an den Niederschlagsbildungsprozessen beteiligt (LAMB & VERLINDE 2011). Ausfallende Eiskri-



**Abb. 3.6-1:** Cirruswolken ziehen als Vorboten einer Warmfront am 19.09.2009 über Tallin auf. Foto: M. Quante.

stalle aus Cirruswolken können zudem in tiefere, unterkühlte Wasserwolken fallen und auch dort entsprechend die Niederschlagsbildung anregen (PRUPPACHER & KLETT 1997).

Trotz des relativ kleinen Anteils am Wasservorrat spielen die Wolken in der Energiebilanz unseres Planeten und im atmosphärischen Wasserhaushalt eine bedeutende Rolle, denn sie reflektieren, absorbieren und emittieren elektromagnetische Strahlung, und ohne Wolken fiel fast kein Niederschlag. Neben dieser zentralen Funktion sind die Wolken an der vertikalen und horizontalen Umverteilung des Wasserdampfes beteiligt. Durch ihre Bedeutung im Strahlungs- und Energiehaushalt bestimmen sie in vielen Regionen die Verdunstungsraten und beeinflussen regionale und lokale Zirkulationssysteme durch das Freisetzen latenter Wärme und die mit Strahlungsprozessen verbundenen Erwärmungs- und Abkühlungsraten.

Der Einfluss von Wolken auf das Klimasystem ist mit größeren Unsicherheiten behaftet als der der Treibhausgase (SOLOMON et al. 2007). Durch Reflexion von Sonnenstrahlung können Wolken kühlen und durch Absorption und Emission von terrestrischer Strahlung wärmen. Die Balance der beiden Effekte hängt empfindlich von den Wolkeneigenschaften wie Höhe, vertikale Erstreckung, Phase und Tröpfchen- oder Partikelgröße und -form ab (BAKER 1997). Cirruswolken kommt hier eine besondere Bedeutung zu, da sie in der oberen kalten Troposphäre in Höhen zwischen 8 und 17 km häufig auftreten (LYNCH et al. 2002). Neben den Strahlungseinflüssen wirkt Eis in Wolken auch über die Niederschlagsbildung auf den globalen Wasserhaushalt und damit auf das Klima ein.

### Cirruswolken

Cirruswolken bestehen exklusiv aus Eiskristallen, sie kommen typischerweise in der oberen Troposphäre

oberhalb von 8 km Höhe vor. Trotz des relativ geringen Anteils an gefrorenem Wasser in der Atmosphäre bedecken Eiswolken einen großen Flächenanteil der Erde und üben einen profunden Einfluss auf unser Klima aus. Dies ist ein schönes Beispiel für den enormen, disproportionalen Einfluss auch kleiner Stoffmengen auf das globale Klima, ein weiteres wichtiges Beispiel sind natürlich die im Infraroten absorbierenden Spurengase.

Cirruswolken kommen über allen Oberflächen und in allen Jahreszeiten vor. Der globale Bedeckungsgrad variiert von Jahr zu Jahr zwischen 20 und 30% und zeigt dabei auch große räumliche und saisonale Schwankungen (QUANTE 2004, KING et al. 2013).

Eiswolken sind in den Tropen sowohl über Land als auch Ozeangebieten besonders häufig anzutreffen. Über Land treten sie mit hochreichender Konvektion auf, über Wasser sind sie mit der Innertropischen Konvergenzzone (ITCZ) assoziiert. Entsprechende jahreszeitliche Verschiebungen sind an die wandernde Position der Sonne gebunden. Ein weiteres Bedeckungsmaximum wird in den Polarregionen zu Zeiten reduzierter Einstrahlung im Winter beobachtet (KING et al. 2013).

Die Bildung von Cirren ist neben einer genügend hohen Übersättigung in Bezug auf Eis stark abhängig von der Verfügbarkeit von Eiskernen, an denen sich Wassermoleküle anlagern können bzw. die durch Kontakt unterkühlte Wassertröpfchen in die Eisphase überführen. Details der mikrophysikalischen Prozesse können hier natürlich nicht ausgebreitet werden, dazu sei auf die Monographien von PRUPPACHER & KLETT (1997) oder LAMB & VERLINDE (2010) verwiesen. Als effektive Eiskerne sind mineralische Substanzen, gealterte Rußpartikel und Partikel biologischen Ursprungs zu nennen, von denen auch viele durch den Menschen in die Atmosphäre eingebracht werden (SZYRMER & ZA-

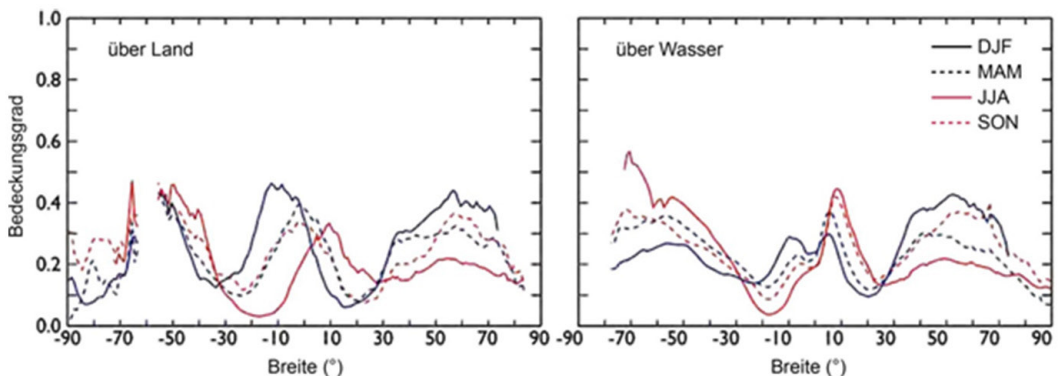


Abb. 3.6-2: Zonaler und saisonaler (2002-2011) Mittelwerte des Bedeckungsgrades am Tage für Eiswolken über Land (links) und über Wasser (rechts) aus KING et al. 2013. Die unterschiedlichen Kurven gelten für die in der rechten Abbildung angegebenen Dreimonatsperioden.

WADZKI 1997). Das Vorkommen und die Eignung von Eiskernen ist ein aktives Feld aktueller Forschung zu Eiswolken, was die an beutender Stelle platzierten Artikel von CZICZO et al. (2013), ATKINSON et al. (2013) und TOBO et al. (2014) belegen. Die strahlungsrelevante interne Struktur von Cirruswolken wird neben dem Wasserdampfangebot und der Verfügbarkeit von Eiskernen auch von komplexen dynamischen Prozessen auf der Meso- und Submesoskala in der stabil geschichteten oberen Troposphäre gesteuert (QUANTE & STARR 2002).

### **Einfluss von Cirruswolken auf das Klima**

Wasser in Form von Eiskristallen stellt wohl das kleinste der Wasserreservoirs in der Atmosphäre dar, dennoch üben die Eiskristalle, wenn sie als Bestandteile großräumiger Cirruswolken auftreten, einen großen Einfluss auf den Energie- und Wasserhaushalt unseres Planeten aus. Der Einfluss dieser Wolken auf das Klima kann über verschiedene Prozesse ablaufen (BAKER 1997). Ein wichtiger Pfad läuft über die vertikale Umverteilung des bedeutenden Treibhausgases Wasserdampf (STEPHENS 2002). Eiskristalle können in der Atmosphäre bis zu mehrere Kilometer fallen, bevor sie vollständig verdunstet sind (PRUPACHER & KLETT 1997). Diese Verlagerung von Wasserdampf aus der klimatisch sensitiven Region der oberen Troposphäre verändert die Treibhauswirksamkeit dieses Gases. Zudem können die Eiskristalle, wenn sie in unterkühlte Wasserwolken fallen, wie oben schon erwähnt, dort die Niederschlagsbildung auslösen oder die Niederschlags-effizienz deutlich erhöhen. Eine weitere und viel beachtete Art des Klimaeinflusses durch Eiswolken besteht über den Einfluss auf die Strahlung. Die Prozesse werden im nächsten Absatz näher besprochen. Über beide Aspekte sind Cirruswolken auch in verschiedenartige Rückkopplungsprozesse im Zusammenhang mit Klimaänderungen eingebunden (STEPHENS 2002).

Tröpfchen und Eiskristalle streuen, absorbieren und emittieren elektromagnetische Strahlung. Somit beeinflussen Wolken das Klima und die Zirkulation durch die Modifikation der horizontalen und vertikalen Verteilung der Erwärmung durch Absorption von Sonnenstrahlung und das Kühlen durch thermische Ausstrahlung. Zwischen Wolken und den kurzwelligen und langwelligen Strahlungsflüssen der Atmosphäre gibt es zahlreiche Wechselwirkungen. Wolken reflektieren die kurzwellige Sonnenstrahlung, absorbieren die langwellige Wärmestrahlung und emittieren selbst wieder im Langwelligen und werden zudem durch alle diese Strahlungsprozesse verändert.

Wolken zeigen ein relativ hohes Reflexionsvermögen (Albedo) im solaren Strahlungsbereich. Die winzigen Wasser- und Eispartikel der Wolken streuen

in der Summe bis zu 80% der auf sie treffenden Sonnenstrahlen zurück in den Weltraum, was zu einer Abkühlung am Boden führt. Wolken wirken aber nicht nur abkühlend. Sie behindern auch die langwellige Wärmestrahlung von der Erdoberfläche und den unteren Schichten der Atmosphäre in den Weltraum, indem sie sie absorbieren und nach allen Seiten wieder emittieren. Die Menge der von einer Wolke emittierten Strahlung hängt vor allem, aber nicht nur, von ihrer Temperatur ab. Die Oberfläche der Wolken ist gewöhnlich, es gibt Ausnahmen, kälter als die Erdoberfläche und emittiert daher weniger Wärmestrahlung Richtung Weltraum als diese. Wolken bewirken damit einen Treibhauseffekt mit entsprechendem Erwärmungspotenzial.

Eine häufig verwendete Kenngröße zur Beschreibung des Einflusses von Wolken auf die Strahlungsbilanz im klimatologischen Sinne ist der sogenannte Wolkenstrahlungsantrieb (*»Cloud radiative forcing«, CRF*). Sie erlaubt es, die Größe der Veränderung der Strahlungsbilanz am Oberrand der Atmosphäre durch die Anwesenheit von Wolken abzuschätzen. Die Größe CRF wird dabei durch die Differenz zwischen der Strahlungsbilanz in wolkenfreien Fällen und der über alle Szenen gemittelten ermittelt.

Der Nettostrahlungsantrieb (NCF) kann in einen kurzwelligen Teil (SWCF) und einen langwelligen Teil (LWCF) aufgespalten werden:  $NCF = SWCF + LWCF = (Q - Q_{clear}) - (F - F_{clear})$ .

[Hier bezeichnet Q die absorbierte solare Strahlung und F die ausgehende langwellige Strahlung am Oberrand der Atmosphäre, der Index »clear« verweist auf den wolkenfreien Fall].

Abschätzungen des Earth Radiation Experiment (ERBE) und auch neuere Studien zeigen, dass Wolken die Erdalbedo in etwa verdoppeln, von ca. 0,15 auf 0,29. Das zugehörige SWCF kommt auf ca.  $-50 \text{ W/m}^2$  im globalen Mittel. Der langwellige Wolkeneffekt durch Absorption und Re-Emission ergibt sich zu  $+30 \text{ W/m}^2$ . Somit kommt es im globalen Mittel durch die heutige Wolkenpopulation zu einem Nettoeffekt von ungefähr  $-20 \text{ W/m}^2$ . Insgesamt kühlen Wolken unseren Planeten (STEPHENS et al. 2012).

Die hohen und dünnen Cirruswolken sind oft transparent für die kurzwellige Solarstrahlung, absorbieren aber die langwellige Wärmestrahlung stärker und emittieren sie sowohl Richtung Weltraum als auch zurück zur Erdoberfläche. Weil Cirruswolken hoch und insofern sehr kalt sind, emittieren sie von der absorbierten Strahlungsenergie nur wenig Richtung Weltraum. Sie üben also einen relativ starken Treibhauseffekt aus. Netto zeigt sich folgendes: Die nach unten gerichtete langwellige Strahlung und die durch die dünnen Cirruswolken durchgehende Solarstrahlung überwiegen zusammen deutlich gegenüber der Abstrahlung in den Weltraum.

Bei niedrigen Wolken verhält sich die Strahlungsbilanz genau umgekehrt. Der Einfluss von verschiedenen hohen Wolken auf das Strahlungsbudget und somit auf das Klima ist in *Abb. 3.6-3* skizziert.

Von neun untersuchten Wolkentypen in einer Studie von CHEN et al. (2000) hatten Cirruswolken (mit optischer Dicke kleiner 3,6 und oberhalb von 440 hPa) den größten Einfluss auf den langwelligen Strahlungsfluss am Oberrand der Atmosphäre mit einem Erwärmungspotenzial von  $+1,3 \text{ W/m}^2$ . In einer ähnlich angelegten Untersuchung fanden HARTMANN et al. (1992) ein Erwärmungspotenzial von  $+2,4 \text{ W/m}^2$ , in dieser Arbeit wurden Eiswolken mit optischer Dicke bis zu 9,4 als Cirrus klassifiziert. Eine 10%-ige Ausweitung der Bedeckung mit Cirruswolken würde den abwärts gerichteten Nettostrahlungsfluss um  $1,7 \text{ W/m}^2$  erhöhen (Erwärmung) (ARKING 1991), was im Vergleich zu den  $4 \text{ W/m}^2$  Erwärmungspotenzial einer  $\text{CO}_2$ -Verdoppelung einen beträchtlichen Betrag darstellt.

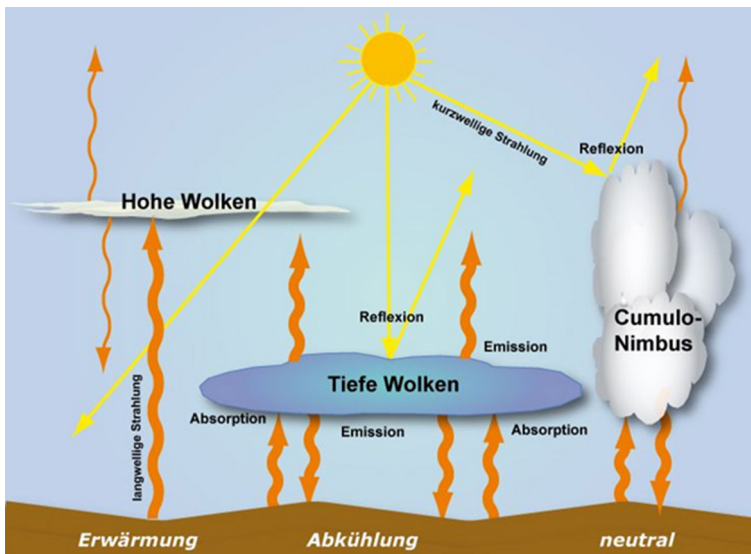
In einzelnen Situationen kann der Effekt von Cirruswolken jedoch sowohl in Richtung Erwärmung wie auch Abkühlung gehen. Wolkenparameter, wie die optische Dicke, Eiskristallgrößen und -formen sind hier entscheidend und bestimmen das Vorzeichen wie die Stärke des Strahlungseffektes (BAKER 1997). Die mikrophysikalischen Parameter können dabei innerhalb eines Cirrusfeldes signifikant variieren (QUANTE 2004).

Ein weites Feld stellt der Einfluss von Aerosolen auf die Wolken und deren Klimawirksamkeit dar (früher auch indirekter Aerosoleffekt genannt). Es sind viele mögliche Pfade in diesem Beziehungsgeflecht vorgeschlagen, erörtert und auch in-situ und in Modellstudien untersucht worden. Jedoch bedarf es zum Aerosol-Wolken-Klimaeffekt noch weitergehender

Forschung. Auch hier kommen die Eiswolken mit ins Spiel (LOHMANN & FEICHTER 2005, BOUCHER et al. 2013). Der Einfluss hängt essentiell von der Art der verfügbaren Aerosole und ihrer jeweiligen Eignung als Eiskerne ab. Ein besonders starker Effekt zeigt sich, wenn unterschiedliche Eiskerntypen mit unterschiedlichen Gefrierschwellenwerten während des Bildungsprozesses in Konkurrenz stehen. Eiskerne könnten in dem Fall, auch wenn sie in sehr geringer Konzentration auftreten, das Vorkommen von klimawirksamen sehr dünnen Cirruswolken signifikant erhöhen. Für die vertiefte Diskussion sei hier auf den Übersichtsartikel von LOHMANN & FEICHTER (2005) verwiesen.

Auch hochfliegende Flugzeuge können die Eisphase in der Atmosphäre beeinflussen. Über ausfließende Kondensstreifen induzierte Cirruswolken oder deren Antriggern durch Kondensstreifen sind dominante Effekte des Luftverkehrs auf das Klima festzustellen, wenngleich auf diesem Gebiet noch große Unsicherheiten bestehen (LEE et al. 2009).

Der Nettoerwärmungseffekt von Cirruswolken im Gegensatz zu tiefen Wasserwolken ist auch Gegenstand von Überlegungen zum sogenannten »Climate Engineering« oder veraltet auch »Geoengineering«. Methoden, die den Bedeckungsgrad von Cirren reduzieren, werden hier ins Feld geführt. Dazu wird ein gezieltes Einbringen von geeigneten Eiskernen in die obere Troposphäre erwogen, um in den komplexen, kompetitiven Partikelbildungsprozess einzugreifen (MICHELL & FINNEGAN 2009). Eine Modellstudie (und es gibt nicht viele) von STORELMO et al. (2013) misst dieser Methode ein hohes Abkühlungspotenzial von  $-2 \text{ W/m}^2$  zu, bemerkt aber auch die großen Unsicherheiten, die mit einem Überreizen der Methode verbunden wären. Ge-



*Abb. 3.6-3: Skizze zum Einfluss von verschiedenen hohen Wolken auf den Strahlungshaushalt und somit auf das Klima. Das Diagramm entstammt dem Klimawandel-Wiki (<http://klimawiki.org>) und steht unter der Creative Commons Lizenz.*

nerell sind bisher keine Untersuchungen unternommen worden, die mögliche Nebenwirkungen des Ausdünnens von Cirrusfeldern beleuchten (BOUCHER et al. 2013).

Mischphasenwolken wurden in dieser kurzen Abhandlung nicht diskutiert, aber auch über diese Wolken spielt die Eisphase eine große Rolle im Klimageschehen, insbesondere auch durch den Einfluss auf die Niederschlagsbildung, und somit auf die Lebenszeit von Wolken und die Bodenfeuchte sowie die Vegetation.

### Kurzes Fazit

Obwohl die Eisphase in der Atmosphäre einen verschwindend kleinen Anteil des Eises im Erdsystem ausmacht, kommt ihr in Hinsicht auf das Klima unseres Planeten eine nicht unwesentliche Bedeutung zu. Cirruswolken haben als Gesamtpopulation die Eigenschaft, über ihren Einfluss auf den Strahlungshaushalt netto in Richtung Erwärmung zu wirken. Als Eiskristallquelle beeinflussen sie auch die Niederschlagsbildung und modifizieren somit den Wasserhaushalt und damit das Klima.

Die Eiswolken sind aus Klimawandelsicht auch in verschiedene Rückkopplungspfade eingebunden. Ein wichtiger, noch nicht abschließend quantifizierter Aspekt scheint dabei auch die Verfügbarkeit von mineralischen und biologischen Eiskernen zu sein, die an eine Veränderung der Bodenfeuchte und auch an das Windklima gekoppelt ist. Zum Wolken-Aerosol-Klima-Effekt für Eis- und Mischphasenwolken sind noch viele Forschungsfragen offen.

Die angemessene Berücksichtigung von Wolken und Aerosolen und deren Wechselwirkungen in Klimamodellen ist immer noch eine große Herausforderung. Dass dieses insbesondere auch für Eiswolken gilt, soll hier noch einmal betont werden.

### Literatur

ARKING, A. (1991): The radiative effects of clouds and their impact on climate. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 72, 795-813.

ATKINSON, J. D., MURRAY, B. J., WOODHOUSE, M. T., WHALE, T. F., BAUSTIAN, K. J., CARSLAW, K. S., DOBBIE, S., O'SULLIVAN, D. & T. L. MALKIN (2013): The importance of feldspar for ice nucleation by mineral dust in mixed-phase clouds. *Nature*, 498, 355-358.

BAKER, M. B. (1997): Cloud microphysics and climate. *Science*, 276, 1072-1078.

BOUCHER, O., D. RANDALL, P. ARTAXO, C. BREHERTON, G. FEINGOLD, P. FORSTER, V.-M. KERMINE, Y. KONDO, H. LIAO, U. LOHMANN, P. RASCH, S. K. SATHEESH, S. SHERWOOD, B. STEVENS & X. Y. ZHANG (2013): Clouds and Aerosols. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

CHEN, T., ROSSOW, W. & Y. ZHANG (2000): Radiative Effects of Cloud-Type Variations. *J. Clim.* 13, 264-286.

CZICZO, D. J., K. D. FROYD, C. HOOSE, E. J. JENSEN, M. DIAO, M.A. ZONDLO, J. B. SMITH, C. H. TWOHY & D. M. MURPHY (2013): Clarifying the Dominant Sources and Mechanisms of Cirrus Cloud Formation. *Science*, 340, 1320-1324.

HARTMANN, D., OCKERT-BELL, M. & M. MICHELSSEN (1992): The Effect of Cloud Type on Earth's Energy Balance: Global Analysis. *J. Clim.*, 5, 1281-1304.

KING, M. D., S. PLATNICK, W. MENZEL, S. A. ACKERMAN & P. A. HUBANKS (2013): Spatial and Temporal Distribution of Clouds Observed by MODIS Onboard the Terra and Aqua Satellites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51, 3826-3852.

LAMB, D. & J. VERLINDE (2011): *Physics and Chemistry of Clouds*. Cambridge University Press, 600 pp.

LEE, D. S., FAHEY, D., FORSTER, P., NEWTON, P. J., WIT, R. C. N., LIM, L. L., OWEN, B. & R. SAUSEN (2009): Aviation and global climate change in the 21st century. *Atmospheric Environment*, 43, 3520-3537.

LOHMANN, U. & J. FEICHTER (2005): Global indirect aerosol effects: A review. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 715-737.

LYNCH, D. K., K. SASSEN, D.O'C. STARR & G. STEPHENS (eds.) (2002): *Cirrus*. Oxford University Press, New York, 480 pp.

MITCHELL, D. L. & W. FINNEGAN (2009): Modification of cirrus clouds to reduce global warming. *Environ. Res. Lett.*, 4, 045102.

PRUPPACHER H. R. & J. D. KLETT (1997): *Microphysics of clouds and precipitation*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 954 pp.

QUANTE, M. (2004): The role of clouds in the climate system. *Journal de Physique IV*, 121, 61-86.

QUANTE, M. & D. O'C. STARR (2002): Dynamical processes in cirrus clouds: Review of observational results. Chapter 17 in: D. Lynch, K. Sassen, D.O'C. Starr, G. Stephens (eds.): *Cirrus*. Oxford University Press, New York, 346-374.

QUANTE, M. & V. MATTHIAS (2006): Water in the Earth's atmosphere. *Journal de Physique*, 139, 37-61.

STEPHENS, G. L. (2002): Cirrus, climate, and global change. Chapter 20 - In: Lynch, D., K. Sassen, D.O'C. Starr, G. Stephens (eds.): *Cirrus*. Oxford University Press, New York, 433-448.

STEPHENS, G. L., LI, J., WILD, M., CLAYSON, C. A., LOEB, N., KATO, S., L'ECUYER, T., STACKHOUSE JR. P. W., LEB SOCK, M. & T. ANDREWS (2012): An update on Earth's energy balance in light of the latest global observations. *Nature Geoscience*, 5, 691-696.

SOLOMON, S. (ed.) (2007): *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2007).

STORELVMO, T., KRISTJANSSON, J. E., MURI, H., PFEFER, M., BARAHONA, D. & A. NENES (2013): Cirrus cloud seeding has potential to cool climate. *Geophys. Res. Lett.*, 40, 178-182.

SZYRMER, W. & I. ZAWADZKI (1997): Biogenic and anthropogenic sources of ice-forming nuclei: A review. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78, 209-228.

TOBO, Y., DEMOTT, P. J., HILL, T. C. J., PRENNI, A. J., SWOBODA-COLBERG, N. G., FRANCO, G. D. & S. M. KREIDENWEIS (2014): Organic matter matters for ice nuclei of agricultural soil origin. *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 8521-8531.

### Kontakt:

Prof. Dr. Markus Quante  
Helmholtz-Zentrum Geesthacht  
Zentrum für Material- und Küstenforschung GmbH  
Markus.Quante@hzg.de

Quante, M. (2015): Anmerkungen über die Eiswolken und ihre Bedeutung. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 99-103. Online: [www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de](http://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de). doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.15