

„Die troposphärische Eisphase“: Ein neuer Sonderforschungsbereich in Frankfurt, Mainz und Darmstadt

Von Stephan Borrmann

Sonderforschungsbereiche sind Ausdruck universitärer Spitzenforschung. Der neue SFB 641 ist nicht nur eine Auszeichnung für die international führende Atmosphärenforschung in Deutschland, sondern auch ein Beispiel gelungener Forschungskooperation im Rhein-Main-Gebiet.

Wenig bekannt ist die Tatsache, dass die meisten Regenfälle auf in den Wolken vorhandenes Eis zurückgehen. Die Wolken, in denen die Temperaturen oberhalb von etwa -15 °C liegen, produzieren den sogenannten „warmen Regen“. Hier kollidieren die einige hundert Mikrometer großen Wolkentröpfchen und verfließen miteinander, so dass schließlich millimetergroße Tropfen entstehen. Diese sind dann zu schwer, um von der turbulenten Luftbewegung im Inneren der Wolken am Schweben gehalten zu werden, und die Tropfen fallen als Regen zu Boden. Allerdings entstehen nur etwa zwanzig Prozent der globalen Niederschläge durch den beschriebenen „warmen Prozess“. Bei den übrigen achtzig Prozent der Niederschläge sind die in „kalten Wolken“ vorkommenden Eisteilchen involviert. Das heißt, Eis- und Schneekristalle, Schneeflocken, Graupelkörner und Hagelsteinchen sind zusammen mit den unterkühlten Wassertröpfchen auf irgendeine Weise bei der Entstehung der meisten Niederschläge beteiligt. Dass diese Wolken wirklich kalt sind, zeigen die Temperaturen um -40 °C bis -60 °C , die in ihnen gemessen wurden und die in den Tropen bis -90 °C herunter reichen können. Die mathematische Beschreibung jedes einzelnen der vielfältigen, komplexen physikalischen und chemischen Prozesse, die innerhalb der vereisten Wolken ablaufen, ist nicht nur erforderlich, um die verwickelten Vorgänge grundsätzlich zu verstehen, sondern auch um zutreffende Vorhersagen des Niederschlags zu erhalten. Weiterhin geschieht die Trennung der elektrischen Ladung in positive und negative Ladungszonen im Bereich hochreichender Gewitterwolken durch miteinander kollidierende Eisteilchen. Dies ist eine notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Blitzen, was wiederum die chemische Zusammensetzung der Luft beeinflusst, denn Blitze sind die wesentliche natürliche Quelle für Stickoxide. Die Stickoxide spielen in der Atmosphärenchemie eine zentrale Rolle. Die wesentlichen Details der Vorgänge im Zusammenhang mit der Verteilung der elektrischen Ladung in Wolken und der Entstehung von Blitzen sind nur qualitativ verstanden und entziehen sich bisher einer rigorosen physikalischen und mathematischen Beschreibung. Weil den Wolken im Zusammenhang mit der Klimadiskussion und dem anthropogenen Treibhauseffekt eine zentrale Rolle zukommt und weil sie die chemische Zusammensetzung beispielsweise verunreinigter Luft verändern können, ist die Erforschung der Wolkenprozesse – und dabei insbesondere der Vorgänge die sich auf die Eisphase beziehen – von größter Bedeutung für die Atmosphärenwissenschaft insgesamt und dabei gleichzei-

tig von gesellschaftlicher Relevanz. Die Kondensstreifen, die häufig hinter Flugzeugen auf Reiseflughöhe entstehen, bestehen ebenfalls aus Eisteilchen, so dass auch ein direkter Bezug zu aktuellen und kontrovers diskutierten Umweltfragen besteht.

Diese und eine Reihe weiterer Erwägungen z.B. zum Energie- und Strahlungshaushalt der Atmosphäre bilden den Hintergrund des neuen Sonderforschungsbereiches SFB 641 „Die troposphärische Eisphase – TROPEIS“, der zum 1. Juli 2004 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) an der Johann Wolfgang Goethe-Universität in Frankfurt (als Sprecheruniversität) und an der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz eingerichtet wurde. Wissenschaftler aus den Mainzer Fachbereichen Physik und Geowissenschaften, den Frankfurter Fachbereichen Geowissenschaften/Geographie und Chemie sowie aus dem Max-Planck-Institut für Chemie in Mainz (mit den Abteilungen für Luftchemie, Biogeochemie und Wolkenphysik und –chemie) und der Technische Hochschule in Darmstadt (Institut für angewandte Geowissenschaften) arbeiten in insgesamt sechzehn, zu zwei Teilbereichen zusammengefassten Teilprojekten zusammen. Diese Projekte umfassen experimentelle Arbeiten zur Entwicklung neuer Messtechnik, Feldexperimente, bei denen Messungen im Inneren der Wolken und ihrer Umgebung durchgeführt werden sollen, sowie theoretische Studien und numerische Simulationen zu Wolkenprozessen, zum Strahlungs-, Wasserdampf- und Energiehaushalt.

Die Wolkentropfen und Eisteilchen entstehen in der Erdatmosphäre ausschließlich an a priori vorhandenen Aerosolteilchen. Welche Eigenschaften der Aerosolpartikel die Bildung von Eisteilchen ermöglichen oder nur die Entstehung von flüssigen Wassertröpfchen erlauben, ist Gegenstand intensiver Forschung. Beispielsweise ist bekannt, dass von etwa 10 000 Aerosolteilchen in der oberen Troposphäre (also in unseren Breiten zwischen etwa acht und zwölf Kilometer Höhe) nur eines ein Eisteilchen bildet. Welche physikalische oder chemische Eigenschaft dieses Einzelne bevorzugt und wie dadurch alle anderen Teilchen benachteiligt werden, ist unbekannt. Da die Schleierwolken (Cirren) aus diesen Eisteilchen bestehen, wissen wir somit noch immer nicht genau, wie die ubiquitären Cirruswolken entstehen. Aus diesen Gründen sind vier Teilprojekte des SFB 641 Messungen und dahinterstehenden Geräteentwicklungen gewidmet, die sich auf die Eisbildungsfähigkeit des atmosphärischen Aerosols und die Verteilung solcher eisbildenden Partikel in der Troposphäre beziehen.

Wenn der thermodynamische Zustand der Atmosphäre und die vorhandenen natürlichen oder anthropogenen Aerosolpartikel zur Bildung der Eisphase in einer Wolke geführt haben, sind mikrometer- bis millimetergroße Eiskristalle von einfachen Formen, wie hexagonalen Plättchen und Säulen, entstanden, die weiterhin die Bildung hochkomplex geformter Eisteilchen ermöglichen. In einem Teilprojekt des Sonderforschungsbereiches wird eine auf der Holografie beruhende Apparatur entwickelt, mit deren Hilfe man vom Flugzeug aus Hologramme von Eisteilchenpopulationen aufnehmen kann. Im Labor oder digital im Computer rekonstruiert, lassen sich durch die Hologramme dreidimensionale Abbilder der Wolkenteilchen erstellen und hinsichtlich Anzahl, Größe, Partikelform und Bewegungsgeschwindigkeit auswerten, um die heterogene Eisparkelpopulation messtechnisch zu erfassen. Vereiste Wolken beeinflussen die einfallende Sonnenstrahlung in mathematisch nur sehr schwer zu berechnender Weise. Cirren zum Beispiel können unter bestimmten Gegebenheiten Treibhauseffekt-verstärkend und damit erwärmend, unter anderen Bedingungen jedoch wegen der dominierenden Reflexion von sichtbarem Sonnenlicht eher kühlend wirken. Besonders ambivalent verhalten sich in dieser Hinsicht die anthropogenen Flugzeugkondensstreifen und die Cirren, die daraus entstehen. Bei den Betrachtungen des Strahlungstransports durch eishaltige Wolken spielen Formen und Komplexität der Eiskristalle die entscheidende Rolle, denn durch sie wird die numerische Modellierung der Strahlungsbilanz außerordentlich kompliziert und von vielen Annahmen abhängig. Flugzeuggetragene gleichzeitige Messungen der Strahlungsintensitäten und Wolkenteilcheneigenschaften dienen hier zur Eingrenzung der Randbedingungen und ein Teilprojekt ist mit der Entwicklung diesbezüglicher Instrumentation befasst. Eine neuartige Methodik kommt zum Einsatz, bei der ein instrumentierter, spindelförmiger Schleppkörper hinter einem ebenfalls instrumentierten Flugzeug in bis zu zehn Kilometer Abstand wiederholbar hergezogen wird.

Die Eispartikel in Wolken stellen eine große, reaktive Oberfläche in der Luft dar, an der Spurengase und Aerosolpartikel adsorbiert werden können und an der vielfältige chemische Reaktionen ablaufen. So vermögen Eiskristalle und Schneeflocken die Atmosphäre sehr effizient etwa von anthropogenen Schadstoffen zu reinigen. Allerdings ist auch der Einbau sogenannter Fremdmoleküle in die Eiskristallgitterstruktur physikalisch schwierig zu beschreiben, weshalb im Rahmen eines theoretisch orientierten Teilprojekts quantenmechanische ab-initio Rechnungen und Kraftfeldmethoden zum Einsatz kommen, um atmosphärisch relevante Parameter zur Spurenstoffaufnahme durch Eis abzuleiten. Ziel eines zweiten, verwandten Projekts ist die Untersuchung der Frage, ob Spurenstoffmoleküle tatsächlich direkt in das Kristallgitter eingebaut werden oder ob sie eher durch Lufteinschlüsse und an Verwerfungen oder

Brüchen der Kristallstruktur inkorporiert werden. Bei langsam wachsenden, kleinen, homogenen Eiskristallen ist dieser Effekt vermutlich klein. Bei dem schnellen Wachstum von Graupelkörnern und Hagelsteinen sowie beim Festfrieren unterkühlter, flüssiger Wassertröpfchen nach Kollision mit Eis- und Schneekristallen (also durch die sogenannte „Bereifung“) vermag er jedoch womöglich die wichtigste Rolle für die Spurenstoffaufnahme zu spielen. In mehreren anderen Projekten werden Labormessungen zur Aufnahme von anorganischen und flüchtigen organischen Fremdmolekülen durch das Eis durchgeführt. Neu ist hierbei, dass speziell wachsende oder verdampfende Eisflächen untersucht werden, denn diese verhalten sich bezüglich der Spurenstoffaufnahme wahrscheinlich deutlich anders als im stationären Gleichgewicht vorliegendes Eis. In einem Teilprojekt



Foto: Stephan Borrmann

kommt der weltweit einmalige Mainzer Vertikalwindkanal zum Einsatz, um die Bereifungsvorgänge an schwebenden Eiskörnern und die Aufnahme der Spurengase dabei zu studieren.

Bei der Betrachtung der Erdatmosphäre sind die Wirkungen der Existenz der Eisphase nicht nur auf die Größendimensionen von Kristallen oder Wolken beschränkt. Weil bei der Eisentstehung die sogenannte „latente Wärme“ frei und an die Wolkenluft abgegeben wird, beeinflusst das Eis größere Systeme wie hochreichende, konvektive Wolkenkomplexe bis hin zu tropischen Wirbelstürmen. Auch die globale Dynamik der tropischen und subtropischen Zirkulation kann wahrscheinlich von der Existenz der Eisphase und den damit verbundenen Energieumwandlungen beeinflusst werden. Um diese Zusammenhänge zu erforschen, bedarf es der numerischen Simulation der hochkomplexen und nichtlinearen in der Atmosphäre ablaufenden Vorgänge, welche Gegenstand von vier theoretisch ausgerichteten Projekten sind. Während eines davon den Einfluss des Eises auf die hochreichenden Aufwärtsströmungen im Inneren von großen Wolken und die daraus resul-

In 11,6 Kilometer Höhe durchstößt am 2. März 2004 in der Nähe von Sao Paulo eine hochquellende Cumulonimbus-calvus Wolke aus flüssigen, unterkühlten Wassertropfen (blumenkohlartige Struktur) einen dünnen Schleier (streifige Struktur) aus Eisteilchen.

tierende (Um)verteilung der Spurenstoffe zum Thema hat, beziehen sich die übrigen theoretischen Teilprojekte auf ganze Tiefdruckgebiete und tropische Orkane (Hurrikane). Hierzu werden modernste Computermodelle, wie beispielsweise das Lokalmodell (LM), das hochaufgelöste Wettervorhersagemodell und das neueste Globalmodell (GME) des Deutschen Wetterdienstes, als Werkzeuge eingesetzt und Daten des Europäischen Zentrums für Mittelfristige Wettervorhersage aus Reading in England verwendet. Ein wesentlicher Aspekt dieser Modellstudien besteht darin, die Erkenntnisse, die aus den anderen Forschungsvorhaben des SFB 641 gewonnen werden, in „modellkompatible“, mathematische Parameterisierungen zu überführen und damit hinsichtlich ihrer Relevanz auf atmosphärische Großstrukturen zu untersuchen.

Mit der Bildung dieses neuen Sonderforschungsbereiches gelang es, an die in der Region seit 1970 – mit einer Unterbrechung von 1997 bis 2004 – verankerten Sonderforschungsbereiche zu Themen der Atmosphärenforschung (SFB 73 „Atmosphärische Spurenstoffe“ und SFB 233 „Chemie und Dynamik der Hydrometeore“) anzuschließen. Derzeit gibt es in Deutschland nur zwei Sonderforschungsbereiche der DFG zu Themen aus der Atmosphärenforschung

Von forschungspolitisch allerhöchster Bedeutung für die deutsche Atmosphärenwissenschaft und damit auch für diesen neuen SFB ist das neue Forschungsflugzeug HALO (High Altitude and Long range research aircraft). Das Bundesministerium für Bil-

dung und Forschung (BMBF) gab am 13. September 2004 bekannt, dass HALO nach mehrjährigen, komplizierten Verhandlungen nun von BMBF, Helmholtz-Gemeinschaft (HGF) und Max-Planck-Gesellschaft (MPG) gemeinsam finanziert und zur Verfügung gestellt wird. Im Rahmen der ersten Phase des SFB 641 von 2004 bis 2008 wird eine Reihe von Messinstrumenten und experimentellen Techniken entwickelt, die im Hinblick auf HALO konzipiert wurden. Daher leistet der SFB 641 nicht nur wissenschaftlich, sondern auch auf technologischem Gebiet wesentliche Beiträge zur Unterstützung der – laut einem Gutachten des Wissenschaftsrates – international führenden Atmosphärenforschung in Deutschland.

■ Summary

Funded by the German Research Foundation (DFG), a new Collaborative Research Center (SFB 641) dedicated to atmospheric research has been established in the Rhine-Main region. Frankfurt University taking the lead, research groups from the University of Mainz, the Max Planck Institute for Chemistry and Darmstadt Technical University conduct a total of sixteen projects concerned with "The Tropospheric Ice Phase". These studies investigate atmospheric ice and snow crystals, graupel and hailstones, as well as aerosol particles and cloud droplets involved in creating airborne ice. The ice phase is of crucial importance to radiative transfer in the atmosphere, to air chemistry, energy redistribution and dynamics.



**Univ.-Prof. Dr.
Stephan Borrmann**

STEPHAN BORRMANN, geboren 1959 in Mainz, studierte Physik in Mainz und ging nach dem Diplom für einen zweijährigen Forschungsaufenthalt an die Naval Postgraduate School nach Monterey, Kalifornien. Es folgten das Promotionsstudium bis 1991 am Mainzer Fachbereich Physik und ein zweijähriger Postdoc-Aufenthalt am National Center for Atmospheric Research in Boulder, Colorado. Nach drei Jahren am Forschungszentrum in Jülich habilitierte sich Stephan Borrmann 1999 im Fach Meteorologie (Mainz). Seit 2000 ist er Professor für beobachtende und experimentelle Meteorologie an der Johannes-Gutenberg-Universität und seit 2001 zusätzlich Direktor (im Nebenamt) der Abteilung für Wolkenphysik und –chemie am Max-Planck-Institut für Chemie. Stephan Borrmann ist Mitglied des DFG Fachkollegiums 313 „Atmosphären- und Meeresforschung“ und Träger des Akademiepreises des Landes Rheinland-Pfalz im Jahr 2004.

■ Kontakt:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Stephan Borrmann,
Stellvertretender Sprecher des SFB 641
Institut für Physik der Atmosphäre
Johannes Gutenberg-Universität Mainz und
Abteilung für Wolkenphysik und –chemie
des Max-Planck-Instituts für Chemie
Becherweg 21
55128 Mainz
Tel. +49 (0) 6131 39-23396
Fax +49 (0) 6131 39-23532
E-Mail: borrmann@uni-mainz.de
<http://www.uni-mainz.de/FB/Physik/IPA>.
<http://www.mpch-mainz.mpg.de/>