

**UNTERM  
WOLKENSCHIRM**

UNTERM WOLKENSCHIRM

# KLIMAWIRKSAME EISKRISTALLE

KLAUS PFEILSTICKER &amp; UGO TRICOLI

**Heidelberger Umweltphysiker haben ein neues Verfahren entwickelt, mit dem sich genauer als bisher voraussagen lässt, wie Wolken das Klima beeinflussen. Eine maßgebliche Rolle dabei spielen kleine Eiskristalle und ihre Fähigkeit, Licht in die Atmosphäre zu reflektieren. Wie Größe, Form und Zusammensetzung der Eispartikel diese Fähigkeit beeinflussen, können die Forscher nun mit hoher Präzision berechnen. Aber nicht nur die Umweltforschung profitiert von dieser neuen Methode.**

# U

Unsere Sonne liefert nahezu die gesamte Energie, um die Prozesse des Klimas anzutreiben und das Leben auf der Erde zu ermöglichen. Die Energie der Sonne wird dabei von elektromagnetischen Strahlen übertragen, die in der Erdatmosphäre und vom Erdboden absorbiert werden – oder aber die Strahlen werden direkt wieder ins Weltall zurückgeschickt. Wie kommt es nun zu dieser Reflexion? Nach den Regeln, die der deutsche Physiker Max Planck aufstellte, wird die absorbierte elektromagnetische Strahlung von Materie, deren Temperatur höher als der absolute Nullpunkt ist (minus 273,3 Grad Celsius), in alle Richtungen wieder emittiert. So geschieht es, dass die warme Erdoberfläche und die warme Atmosphäre die von der Sonne empfangene Strahlungsenergie in das kalte Weltall abstrahlen. Global sollten die absorbierte, also die nicht reflektierte Sonnenstrahlung sowie die emittierte Wärmestrahlung dabei in einem Gleichgewicht stehen.

Lokal und regional gibt es jedoch große Abweichungen von diesem Gleichgewicht. In den Tropen beispielsweise wird mehr Sonnenlicht von der Atmosphäre und dem Boden aufgenommen als Wärmestrahlung in das Weltall abgestrahlt werden kann. In den Polargebieten ist es genau umgekehrt. Derartige Überschüsse oder Defizite gleicht das Klimasystem der Erde mit Transportprozessen aus. Ein Beispiel für einen Energietransportprozess im Ozean ist der Golfstrom: Er befördert enorme Energiemengen aus dem tropischen in den nördlichen Atlantik. In der Atmosphäre geschehen solche Transportprozesse beispielsweise durch die „Fronten“, also den Wechsel von Hoch- und Tiefdruckgebieten, wie wir sie aus den mittleren Breiten kennen und die unser Wetter und Klima maßgeblich bestimmen.

Wollen wir nun die lokale oder regionale Energiebilanz des Erdbodens und der Atmosphäre berechnen, begegnen wir folgender Frage: Wie wird die Strahlungsbilanz durch Bewölkung verändert? Denn Wolken schirmen die Erde von den Sonnenstrahlen ab und reflektieren sie unmittelbar ins All. Demnach wäre zu erwarten, dass Wolken auf das Klima stets eine kühlende Wirkung haben. So einfach aber ist es nicht, weil Wolken auch die Abstrahlung der Wärme von der Oberfläche der Erde und den bodennahen atmosphärischen Schichten blockieren. Infolgedessen haben sie nicht nur einen kühlenden, sondern auch einen wärmenden Effekt auf das Klima. Beispiele für beide Phänomene kennt

# „Unsere Arbeitsgruppe ist seit Jahren an Messungen von Wolken über dem Pazifik mit der NASA-Drohne ‚Global Hawk‘ beteiligt.“

jeder aus Alltagsbeobachtungen: Wolken an einem Sommertag senken die Temperatur – Winternächte mit Wolken aber sind stets wärmer als Winternächte ohne Wolken.

Eine besondere Herausforderung stellen hohe Wolken dar, sogenannte Altostratus und Zirren. Sie treten vor allem in den Tropen, vor Tiefdruckfronten in den mittleren Breiten oder auch als Kondensstreifen am Himmel auf. In diesen Wolkentypen sind zumeist kleine, wenige zehn Mikrometer große Eiskristalle enthalten. Untersuchungen haben nun gezeigt, dass es stark von der Größe, Form und Zusammensetzung dieser Eisteilchen abhängt, ob sich Wolken eher wärmend oder eher kühlend auf das Klima auswirken. Weltweit arbeiten Forscher intensiv daran, besser zu verstehen, wie sich solche Eisteilchen bilden, welchen Effekt sie auf die atmosphärische Strahlungsbilanz haben und was sie für das Klimageschehen bedeuten.

## Entdeckungsreisen in den Wolken

Die Wissenschaftler nutzen zur Erkundung der Wolken verschiedene Verfahren vor Ort, aber auch Fernerkundungsmethoden wie hoch fliegende Drohnen oder Forschungsflugzeuge. In den letzten Jahren haben wir uns an Untersuchungen von Zirren über dem Pazifik mit der NASA Drohne „Global Hawk“ beteiligt. In den mittleren Breiten unternahmen wir zusammen mit Kollegen vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Messungen an Zirren mit dem hoch fliegenden



**PROF. DR. KLAUS PFEILSTICKER** studierte Physik an den Universitäten Ulm, Heidelberg und Beersheba (Israel). Im Jahr 1985 wurde er an der Universität Heidelberg promoviert, anschließend arbeitete er unter anderem am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, am Forschungszentrum Jülich und am Aeronomy Laboratory der „National Oceanic and Atmospheric Administration“ in Boulder, USA. Seit 2005 ist er außerplanmäßiger Professor am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Physik und Chemie der oberen Troposphäre.

Kontakt: klaus.pfeilsticker@iup.uni-heidelberg.de

Forschungsflugzeug HALO des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt. Darüber hinaus studieren wir die Bildung von Eisteilchen und die Art und Weise, wie sie das Licht streuen, intensiv in Simulationskammern, etwa in der weltweit einzigartigen AIDA-Wolkenkammer am KIT in Karlsruhe.

Eine besondere Bedeutung bei unseren Untersuchungen kommt dem „Small Ice Detector“ (SID) zu, einem Instrument, das die Lichtstreuung einzelner Eiskristalle exakt vermessen kann. Um die erzielten Ergebnisse aber richtig interpretieren zu können, bedarf es zunächst umfangreicher theoretischer Simulationen der Lichtstreuung. Dies ist eine besondere Herausforderung, da die Eispartikel zumeist recht kompliziert geformt sind. Am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg haben wir zu diesem Zweck eine neuartige und präzise theoretische Methode entwickelt, die sich stark an die Berechnungen quantenmechanischer Streuprozesse anlehnt. Wir zerlegen dazu Eiskristalle in viele kleine Unterelemente, an denen einfallende Lichtwellen jeweils einzeln streuen. Die Wirkung, die umgebende Unterelemente dabei auf die einfallenden Lichtwellen haben, wird im Rechenvorgang phasengenau berücksichtigt. Später addieren wir alle Störungen und berechnen die ausgehende Lichtwelle.

Verglichen mit herkömmlichen physikalischen Methoden, die erfassen können, wie Licht an festen Teilchen streut, bietet unser Verfahren einige Vorteile: Zum einen dürfen die Unterelemente über unterschiedliche optische Eigenschaften verfügen, weshalb sich mit unserem Verfahren auch die Lichtstreuung von festen Teilchen mit Einschlüssen wie Fremdkörpern oder Luftblasen berechnen lässt; zum anderen können die festen Teilchen beliebige Formen haben. Denn es zeigte sich, dass die Genauigkeit der Methode nicht von der Gestalt der Partikel abhängt, sondern von der Anzahl der Unterelemente sowie der präzisen Beschreibung von Oberflächen und Einschlüssen der Eisteilchen. Mit unserem Verfahren lässt sich demnach die Lichtstreuung schrittweise immer besser berechnen, indem die Teilchen immer feiner in eine zunehmend größer werdende Anzahl von Unterelementen zerlegt werden, die Kontakt zur Oberfläche oder auch zu Einschlüssen wie Fremdkörpern und Luftblasen haben.

Dabei aber gibt es ein Problem: Je größer die Anzahl der untersuchten Unterelemente wird, desto aufwendiger und zeitintensiver wird der Rechenvorgang. Deshalb benötigt man für die Berechnung einen sehr leistungsstarken Computer, wie er beispielsweise mit dem BWHPC-Hochleistungsrechner der Universität Heidelberg zur Verfügung steht. Das Verfahren lässt sich auch beschleunigen, indem die Rechenprozesse parallel geschaltet werden: Die Lichtstreuung an den einzelnen Unterelementen lässt sich dann unabhängig von den Beiträgen der anderen Unterelemente ermitteln, und der Rechenvorgang kann auf viele Prozessoren verteilt werden. Die Summation aller Streubeiträge schließlich führt zum Ergebnis.

UNDER THE CLOUD COVER

# THE CLIMATIC EFFECT OF ICE CRYSTALS

KLAUS PFEILSTICKER &amp; UGO TRICOLI

Solar radiation drives the climate and supports life on Earth. The received amount of solar energy, however, is not evenly distributed across the globe, nor is the loss of energy by thermal radiation into space. Therefore energy needs to be transported by oceanic currents and the atmosphere from the excess regions, for example the tropics, to the defective polar regions. An important moderator of the climate's energy budget is the cloud cover. Clouds are known to shield the surface from solar radiation, while preventing thermal radiation from escaping into space. Clouds that occur at high altitude and are hence very cold, such as cirrus clouds containing solid ice crystals, are particularly intriguing objects. Their ability to reflect solar radiation back into space depends largely on the crystal habit, i.e. the size, shape, and roughness of the ice crystals.

A joint research team of the Karlsruhe Institute of Technology (KIT) and the Heidelberg Institute of Environmental Physics (IUP) is now tackling a new frontier in attempting to unravel how irregularly shaped ice crystals scatter light. The studies involve experiments performed both in the laboratory and the field, with supporting information drawn from a novel numerical method that helps scientists to accurately compute light scattering by irregularly shaped particles. At its core, the new method is based on tools known from the so-called local perturbation theory, which is often applied to solve scattering problems of complex quantum mechanical systems. It has the advantage of being able to compute light scattering by irregularly shaped particles to any degree of accuracy – provided the shape of the particle and its optical properties are known – but with the drawback of requiring increasingly large amounts of computing power. The method not only permits a more thorough investigation of light scattering by atmospheric ice crystals; it may also give rise to new applications in solving light scattering problems in surface physics, optical applications in medicine, and plasmonics in microelectronics. ●

PROF. DR KLAUS PFEILSTICKER read physics at the universities of Ulm, Heidelberg and Beersheba (Israel). He obtained his PhD from Heidelberg University in 1985 and went on to work at the Max Planck Institute for Nuclear Physics in Heidelberg, at Forschungszentrum Jülich and at the Aeronomy Laboratory of the 'National Oceanic and Atmospheric Administration' in Boulder, USA. In 2005 he accepted a position as adjunct professor at Heidelberg University's Institute of Environmental Physics. His research focuses on the physics and chemistry of the upper troposphere.

Contact: klaus.pfeilsticker@iup.uni-heidelberg.de

DR UGO TRICOLI studied physics at the universities of Modena and Bologna in Italy. He obtained his master's degree in 2011 with a thesis that he completed at the Niels Bohr Institute in Copenhagen. The research he did between 2012 and 2015 for his PhD thesis on light scattering by solid ice particles took him to Heidelberg University's Institute of Environmental Physics and the 'Fundamental Physics' graduate school (HGSFP) of the Heidelberg Faculty of Physics and Astronomy. Since November 2015 he works as a postdoctoral fellow at the Institute Fresnel of the University of Aix-Marseille in France.

Contact: ugo.tricoli@iup.uni-heidelberg.de

**“Our new computational method allows us for the first time to efficiently simulate light scattering by irregularly shaped ice particles with a high degree of precision.”**

### Regelmäßig und unregelmäßig geformte Eiskristalle

Die neue Rechenmethode erbringt den entscheidenden Vorteil, dass sich erstmals auch die Lichtstreuung der in den Wolken recht häufig vorkommenden rauen, unregelmäßig geformten Eisteilchen genau beschreiben lässt. An regelmäßig geformten Eisteilchen führt die Lichtstreuung zu einem sogenannten Halo, einem hellen Ring, wie er am Himmel im Abstand von 22 Grad um das von der Sonne oder dem Vollmond einfallende Licht zu beobachten ist. Bei unregelmäßig geformten Eisteilchen hingegen tritt dieser Effekt nicht auf. Interessanterweise kann man die seltenen Halos vor allem im Winter in klaren Vollmondnächten beobachten. Dies hat mit der Vorgeschichte der Luftmasse zu tun: Die Bildung regelmäßig geformter Eisteilchen wird von den gemächlichen Vertikalbewegungen der Atmosphäre im Winter begünstigt, weil die Eisteilchen dann langsam – nahe dem Gleichgewicht zwischen ihrer Bildung und Verdunstung – wachsen können. Für unregelmäßig geformte Eiskristalle wird hingegen vermutet, dass ihr Entstehen auch von der Luftverschmutzung durch Schwebeteilchen (Aerosole) befördert wird.

Worin liegt der Fortschritt, den die Klimaforschung von der neuen Berechnungsmethode für die Lichtstreuung an festen und gleichzeitig unregelmäßig geformten Teilchen erwarten kann? Die Wirkung der hohen und damit kalten Wolken für die atmosphärische Strahlungsbilanz hängt entscheidend von ihrem Vermögen ab, Sonnenlicht zu reflektieren – also von der Art und Weise, wie die Wolkenpartikel Licht streuen. Unsere neue Methode hat gezeigt, dass unregelmäßig geformte Eisteilchen das Sonnenlicht wesentlich besser in die einfallende Richtung – also ins Weltall – zurückstrahlen als regelmäßig geformte Wolkenpartikel. Enthalten die in den Tropen weitverbreiteten Zirren viele raue Partikel, nimmt in der Strahlungsbilanz ihr kühlender Anteil folglich stark zu. Aber nicht nur für die Klimaforschung, auch für andere Forschungszweige und Anwendungen lässt sich unsere neue Rechenmethode verwenden – beispielsweise für Fragestellungen zur Lichtstreuung in der Mikrosystemtechnik und in der Oberflächenphysik, für lichtoptische Anwendungen in der Medizin oder auch für die Mikroelektronik. ●



**DR. UGO TRICOLI** studierte Physik an den Universitäten Modena und Bologna, Italien. Im Jahr 2011 schloss er seinen Master mit einer Arbeit ab, die er am Niels-Bohr-Institut in Kopenhagen durchführte. Für seine Promotionsarbeit über die Lichtstreuung an festen Eisteilchen forschte er in den Jahren 2012 bis 2015 am Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg und an der Graduiertenschule „Fundamental Physics“ der Heidelberger Fakultät für Physik und Astronomie. Seit November 2015 ist er als Postdoktorand am Institut Fresnel der Universität Aix-Marseille in Frankreich beschäftigt.

Kontakt: [ugo.tricoli@iup.uni-heidelberg.de](mailto:ugo.tricoli@iup.uni-heidelberg.de)

„Mit unserer neuen Rechenmethode lässt sich erstmals die Lichtstreuung von unregelmäßig geformten Eisteilchen hoch präzise beschreiben.“