

Mehr Wolken durch Iod

Das CLOUD-Experiment am CERN hat gezeigt, dass durch Iodverbindungen in der Atmosphäre sehr effizient Wolkenkondensationskeime entstehen.

Christiane Schulz und Johannes Schneider

Atmosphärische Iodverbindungen entstammen vor allem aus den Ozeanen. Da die globale Erwärmung die Fläche und Dicke des Meereises verringert, entstanden in den letzten siebzig Jahren immer größere Flächen offenen Wassers, welche die Iodverbindungen emittieren können. Mit der erhöhten Emission könnten sich verstärkt atmosphärische Aerosolpartikel neu bilden. Dieser Prozess heißt Nukleation und führt dazu, dass Kondensationskeime entstehen, aus denen sich Wolken entwickeln. Eine vermehrte Wolkenbildung erwärmt die Arktis weiter und verstärkt so das Schmelzen des Meereises. Falls Iodverbindungen an der Nukleation beteiligt sind, führt die positive Rückkopplung also zu einem sich selbst verstärkenden Effekt (Abb. 1). In der Atmosphäre über Küstenregionen wurde dies bereits beobachtet [1]. Der genaue Prozess, insbesondere die mögliche Beteiligung von Ionen in der Erdatmosphäre, war jedoch bisher nicht verstanden, weil Daten unter kontrollierten, atmosphärisch relevanten Bedingungen fehlten. Diese liegen nun vom CLOUD-Experiment vor für die Nukleation von Iodverbindungen in der marinen Grenzschicht der Atmosphäre [2].

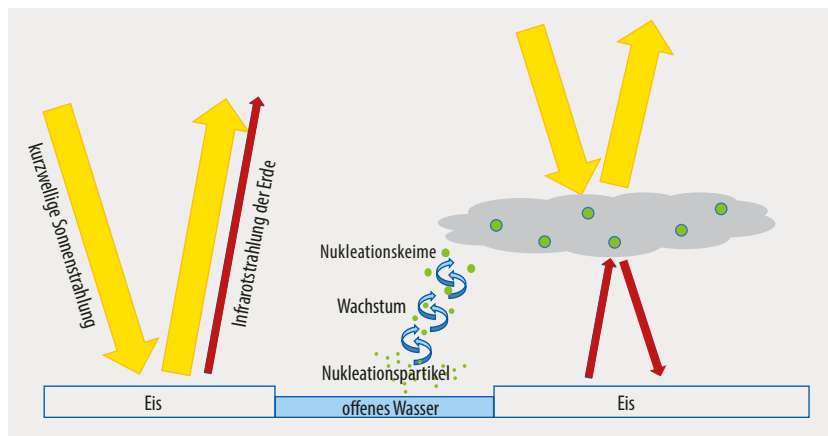


Abb. 1 Eine Eisfläche reflektiert aufgrund ihrer hohen Albedo den meisten Teil der Sonnenstrahlung in den Weltraum (links). Über offenem Wasser sorgen Nukleationspartikel für eine verstärkte Wolkenbildung (Mitte). Das sorgt für eine Erwärmung, weil eine Wolke verhindert, dass die von der Erde emittierte Infrarotstrahlung in den Weltraum entweicht (rechts). Die Wirkung von Treibhausgasen auf die Infrarotstrahlung ist hier vernachlässigt.

Ein Forschungsteam aus 17 Instituten aus neun Ländern betreibt das „Cosmics Leaving Outdoor Droplets“-Experiments am CERN. Mit einer Atmosphären-Simulationskammer untersucht das Team dort die Nukleation in einer hochreinen Umgebung unter realistischen atmosphärischen Bedingungen. Die Besonderheit ist die Simulation natürlicher kosmischer Strahlen durch einen Pionenstrahl. Dieser entsteht mit einer

Energie von 3,5 GeV im Protonen-Synchrotron. Damit lassen sich die Bedingungen in Höhe der Tropopause nachstellen, wo die Intensität kosmischer Strahlung höher ist als am Boden. Ein elektrisches Feld mit 20 kV m^{-1} kann alle Ionen entfernen, falls die Nukleation unter neutralen Bedingungen stattfinden soll.

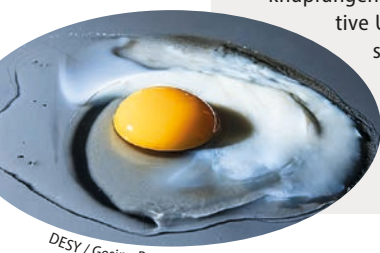
In der Atmosphäre stellt die Nukleation eine wichtige Quelle für Aerosolpartikel dar [3]. Allerdings

Kurzgefasst

Das Ei im Röntgenstrahl

Mit DESYs Röntgenlichtquelle PETRA III hat ein Forschungsteam die Proteindynamik im Eiweiß beim Kochen über eine Viertelstunde analysiert. In den ersten drei Minuten wuchs das Proteinnetzwerk exponentiell und erreichte nach fünf Minuten ein Plateau, auf dem sich nahezu keine weiteren Proteinverknüpfungen mehr formten. Die innovative Untersuchungsmethode ist sowohl für die Lebensmittelindustrie interessant als auch für Proteinanalysen.

N. Begam et al., Phys. Rev. Lett. **126**, 098001 (2021)



DESY / Gesine Born

Sechs Moleküle auf einen Streich

Durch Beobachtungen mit dem italienischen Telescopio Nazionale Galileo (TNG) auf La Palma und dank innovativer Datenanalyse gelang es erstmals, sechs Moleküle in der Atmosphäre eines Exoplaneten gleichzeitig nachzuweisen. Beim vor über 20 Jahren entdeckten Exoplaneten HD209458b fanden sich Wasser, Kohlenmonoxid, Cyanwasserstoff, Methan, Ammoniak und Acetylen. Das deutet auf eine größere Häufigkeit von Kohlenstoff als von Sauerstoff hin.

P. Giacobbe et al., Nature, **592**, 205 (2021)

Atomarer Minimotor

Ein Team um Artur Widera (TU Kaiserslautern) und Eric Lutz (U Stuttgart) konnte einen Otto-Kreisprozess in der Quantenwelt realisieren. Als Medium diente ein Gas aus Rubidium-Atomen, welches – um thermische Fluktuationen auszuschließen – bis fast an den absoluten Nullpunkt abgekühlt war. Der „Treibstoff“ im System war der Spin der Rb-Atome. Die Miniaturmaschinen bestanden aus einzelnen Cs-Atomen, der notwendige Wärmeaustausch erfolgte beim Zusammenstoßen von Cs- und Rb-Atomen.

Q. Bouton et al., Nat. Commun. **12**, 2063 (2021)

scheinen nur bestimmte Verbindungen beteiligt zu sein. Dazu zählen Schwefelsäure, Ammoniak, Amine, Methansulfonsäure, Iodverbindungen und stark oxidierte organische Moleküle. Bei Übersättigung können die Gasmoleküle durch Kollision Molekülcluster bilden. Überschreiten die Cluster einen kritischen Durchmesser, bilden sie stabile Aerosolpartikel. Dazu gilt es, eine Energiebarriere zu überwinden, die sich sowohl bei niedriger Temperatur als auch durch das Vorhandensein von Ionen aus kosmischer Strahlung verringert. Schwefelsäure (H_2SO_4) gilt als ein entscheidender Treiber der Nukleation in der Atmosphäre aufgrund ihres niedrigen Dampfdrucks und der starken Affinität für Wasser. Ammoniak (NH_3) und Amine können auf gebildete Cluster stabilisierend wirken und so die Partikelbildung verstärken.

Um den Prozess der Nukleation von Iodverbindungen genauer zu untersuchen, wurden I_2 -Moleküle und Ozon in der 26 Kubikmeter großen CLOUD-Kammer mit grünem Licht der Wellenlänge 528 nm bestrahlt. Diese Wellenlänge simuliert Sonnenlicht im sichtbaren Bereich ohne UV-Strahlung, was die realen Bedingungen auch bei bewölktem Himmel nachstellt. Licht dieser Wellenlänge spaltet die I_2 -Moleküle, und sie reagieren über Hydratisierung und Reaktion mit Ozon zu den Iodsauerstoffsäuren HIO_2 (Iodige Säure) und HIO_3 (Iodsäure). Diese bildeten dann sofort neue Aerosolpartikel durch Nukleation – unter neutralen Bedingungen wie auch bei vorhandenen Ionen. Die Nukleationsrate war dabei sogar höher als in einem H_2SO_4 - NH_3 -System. Die Daten zum H_2SO_4 - NH_3 -System stammen aus früheren Experimenten in der CLOUD-Kammer [4]. Bei einer H_2SO_4 -Konzentration von $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-3}$ kann die Nukleationsrate bis zu $7 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ betragen. Im Vergleich dazu liegen die Werte für die Nukleationsrate von HIO_3 bei bis zu $30 \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$. Eine niedrigere Temperatur erhöht in beiden Systemen die Nukleationsrate.

Die Wachstumsrate der Partikel beträgt im H_2SO_4 - NH_3 -System einige Nanometer pro Stunde und hängt von der H_2SO_4 -Konzentration und der Temperatur ab. Die Werte für Iodsau-

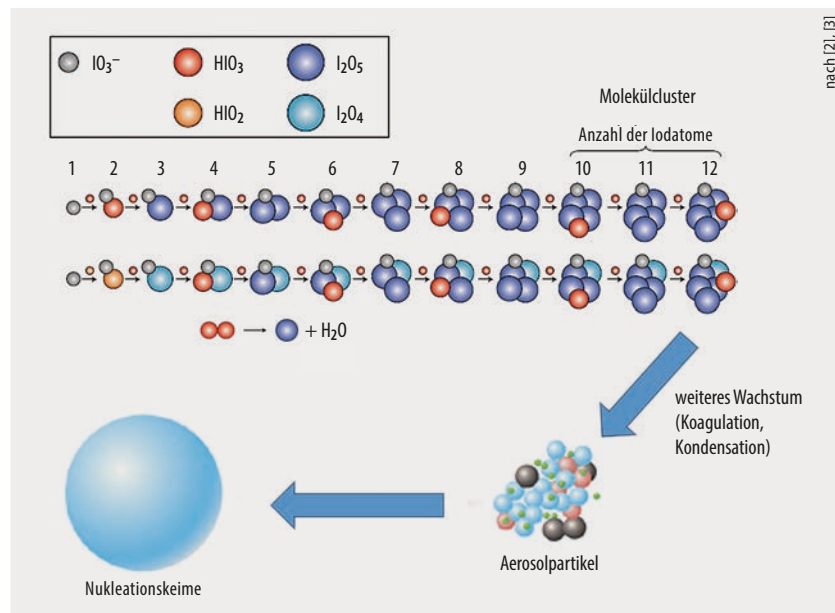


Abb. 2 Das Schema zeigt anhand des Beispiels der ioneninduzierten Nukleation von HIO_3 (rot) und HIO_2 (gelb), wie die Partikel mittels sequenzieller Addition aus einem IO_3^- -Ion (grau) wachsen. Durch Dehydratation entsteht im Cluster I_2O_5 (blau) bzw. I_2O_4 (cyan).

erstoffsäurepartikel sind ähnlich groß. Das Wachstum liegt demnach nahe am kinetischen Limit, sodass fast jedes auftreffende Gasmolekül am neu gebildeten Cluster haften bleibt. Bei der ioneninduzierten Nukleation von Iodsauerstoffsäuren findet eine sequenzielle Addition von HIO_3 zu HIO_3 - I_2O_5 - IO_3^- -Ionen statt. Darauf folgt die Dehydratation von $HIO_3 \cdot HIO_3$ -Paaren im Cluster, wobei I_2O_5 entsteht (Abb. 2). Ionenrekombination neutralisiert die Cluster vollständig, bevor sie etwa drei Nanometer groß sind. Danach wachsen sie vor allem durch Aufkondensation von HIO_3 als neutrale Partikel weiter. Bei der neutralen Nukleation stabilisiert HIO_2 die HIO_3 -Cluster, da neutrale HIO_3 - I_2O_5 -Cluster nur schwach gebunden sind.

Die Messungen am CLOUD-Experiment zeigen, dass Iodsauerstoffsäuren auch in der Atmosphäre eine wichtige Rolle bei der Partikelbildung spielen – vor allem in Regionen, in denen HIO_3 häufiger vorkommt als H_2SO_4 . Dafür kommt insbesondere die Arktis mit ihrer wachsenden offenen Wasseroberfläche infrage, wo die verstärkte Nukleation durch Iodsauerstoffsäuren zu erhöhter Wolkenbildung führen kann. Zwar haben Wolken im Allgemeinen einen kühlenden Effekt auf die Atmosphäre. In der Arktis führen sie jedoch zu einer Erwärmung [5] aufgrund

der stark reflektierenden Oberfläche aus Schnee und Eis (Abb. 1). Das Abschmelzen des arktischen Meereises gehört zu den Kippunkten im Klimasystem: Es ist einer der Prozesse, die sich auch bei einer zukünftigen Reduktion anthropogener Treibhausgase nicht mehr rückgängig machen lassen [6]. Daher gilt es, die möglichen Auswirkungen der Iodsauerstoffsäuren in aktuellen Klimamodellen zu berücksichtigen. Wie häufig die Iodverbindungen in arktischen Wolken tatsächlich vorkommen, sollen bereits geplante Feldmessungen zeigen.

- [1] C. D. O'Dowd et al., Nature **417**, 632 (2002)
- [2] X.-C. He et al., Science **371**, 589 (2021)
- [3] M. Kulmala, Science **302**, 1000 (2003)
- [4] J. Kirkby et al., Nature **476**, 429 (2011)
- [5] M. Wendisch et al., Bull. Am. Met. Soc. **100**, 841 (2019)
- [6] T. M. Lenton et al., Proc. Nat. Acad. Sci. **105**, 1786 (2008)

Die Autoren

Dr. Christiane Schulz, Leibniz-Institut für Troposphärenforschung, Permoserstraße 15, 04318 Leipzig und Max-Planck-Institut für Chemie, Hahn-Meitner-Weg 1, 55128 Mainz und **Dr. Johannes Schneider**, Max-Planck-Institut für Chemie, Hahn-Meitner-Weg 1, 55128 Mainz