

Kristallklar und federleicht: Eiswolken im Labor

M. Schnaiter, S. Benz, O. Möhler, R. Schön, IMK

Einleitung

Zirruswolken (von lateinisch *cirrus* = Haarlocke) bestehen ausschließlich aus feinen etwa 0,01 bis 1 mm großen Eiskristallen. Sie kommen nur in sehr großen Höhen vor, weil erst deutlich über 6 km so tiefe Temperaturen erreicht werden, dass unterkühlte Wolkentröpfchen nicht mehr existieren können. Ihren Namen tragen Zirren wegen ihres federartigen Aussehens, das auf die langsame Sinkgeschwindigkeit der winzigen Eiskristalle und Windscherungen zurückgeführt wird. Die hexagonalen Eiskristalle können durch Brechung des Sonnenlichtes eindrucksvolle optische Phänomene verursachen: stern- und bogenförmige Leuchterscheinungen, die in bestimmten Richtungen und festen Winkeln von der Sonne auf-

treten und als Halos bezeichnet werden.

Hohe Zirren sind klimawirksam, weil sie sichtbares Sonnenlicht zurückstreuen, während sie die Wärmestrahlung der Erde absorbieren (Abb. 1). Es gibt Hinweise, dass menschliche Aktivitäten, insbesondere Emissionen des Luftverkehrs die Häufigkeit der Zirrenbildung und ihre Strahlungseigenschaften verändern. Die Folgen für das Erdklima sind allerdings noch sehr unzureichend erforscht [1].

Für die Zirrenbildung sind Aerosolpartikel von entscheidender Bedeutung, denn zur Entstehung von Eiskristallen in wolkenfreier Luft müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

Das Eis-Sättigungsverhältnis S_{Eis} (= Quotient aus herrschendem Wasserdampf-Partialdruck und dem Gleichgewichts-Dampfdruck

über Eis bei der gegebenen Temperatur) muss den Wert eins übersteigen

Es müssen Lösungströpfchen oder feste Partikel vorhanden sein, auf denen sich der Wasserdampf als Eis abscheiden kann oder in denen Eiskeime spontan entstehen.

Übersättigte Bedingungen mit $S_{\text{Eis}} > 1$ entstehen, wenn feuchte Luft konvektiv oder durch Aufgleiten expandiert und sich dabei adiabatisch abkühlt. Flugzeugmessungen haben gezeigt, dass zur Zirrenbildung vorwiegend winzige Schwefelsäuretröpfchen, Wüstenstaub und Rußpartikel mit Größen unter 0,001 mm beitragen. Schwefelhaltige Gase stammen zum Teil aus natürlichen Quellen wie Vulkanen, werden aber auch von Flugzeugen emittiert, die mit schwefelhaltigem Kerosin fliegen. Dabei entstehen zugleich Rußpartikel,

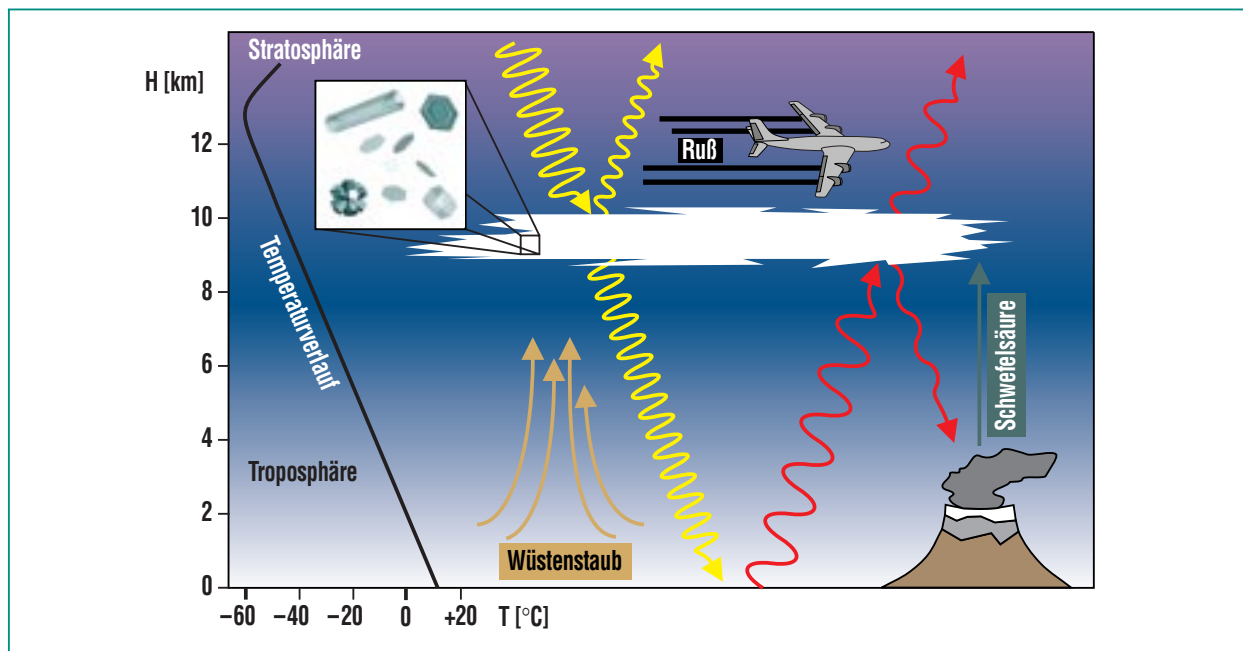


Abb. 1: Zirruswolken entstehen in der kalten oberen Troposphäre. Natürliche und vom Menschen gemachte Aerosole spielen dabei eine Schlüsselrolle und haben somit Einfluss auf die klimarelevanten Strahlungseigenschaften der Zirren.

die jedoch auch aus bodennahen Quellen stammen können, falls sie wie Wüstenstaub in große Höhen getragen werden. Der Mensch kann also die Zirrenbildung auf vielfältige Weise direkt oder indirekt beeinflussen. Ziel der hier vorgestellten Arbeiten ist ein besseres Verständnis dieser Einflüsse und deren Auswirkungen auf den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und damit das Klima.

Die Wolkenkammer AIDA

Mit der Wolkenkammer AIDA (Aerosol-Interaktionen und Dynamik in der Atmosphäre) des Instituts für Meteorologie und Klimaforschung verfügt das Forschungszentrum Karlsruhe über eine weltweit einmalige Versuchsanlage zur Untersuchung der Bildungsprozesse und optischen Eigenschaften von Zirren [2]. In der bis auf -90 °C kühlbaren Kammer, die aus einem zylindrischen Aluminiumgefäß mit 84 m^3 Rauminhalt besteht, lassen sich die bei der Entstehung natürlicher Zirren herrschenden Temperatur- und Druckverhältnisse realitätsnah nachbilden. Eis-Sättigungsverhältnisse bis zu 2 werden dynamisch erzeugt, indem der Druck in der vorgekühlten Kammer, ähnlich wie in einem rasch aufsteigenden Luftpaket in der freien Atmosphäre, durch starkes Pumpen kontinuierlich abgesenkt wird, wodurch sich das Kammervolumen adiabatisch abkühlt.

Zum Studium der Zirrenbildung sind höchstempfindliche Nachweismethoden für die Entstehung und das Wachstum winziger Eiskristalle unerlässlich. An AIDA kommen verschiedene optische Ver-

fahren zum Einsatz, die am Institut speziell für diesen Zweck entwickelt wurden. Zum Nachweis der Eisbildung wird ausgenutzt, dass polarisiertes Laserlicht bei der Streuung an Eiskristallen selektiv depolarisiert wird, während von runden bzw. viel kleineren Aerosolpartikeln gestreutes Licht seine Polarisation beibehält. Form und Wachstum der erst wenige μm großen Eiskristalle werden mit einem für diesen Zweck entwickelten ultraschnellen Mikroskop (8 ns Belichtungszeit) untersucht. Es bildet die luftgetragenen Kristalle auf einem CCD-Chip ab (Abb. 2), mit dem während eines einzigen Experiments tausende von Bildern geschossen werden können. In einer zweiten Entwick-

lungsstufe wird das Gerät gleichzeitig die klimarelevanten Streueigenschaften der Eiskristalle winkelaufgelöst messen.

Experimente mit künstlichen Eiswolken

In einer Serie von AIDA-Messkampagnen wurden die zur Eisbildung erforderlichen kritischen Temperaturen und Sättigungsverhältnisse S_{Eis} für eine Reihe von atmosphärisch relevanten Aerosolen untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse für Schwefelsäuretröpfchen, Mischpartikel aus Ruß und Schwefelsäure (als Modell für Aerosole aus dem Flugverkehr), sowie für Wüstenstaub sind in

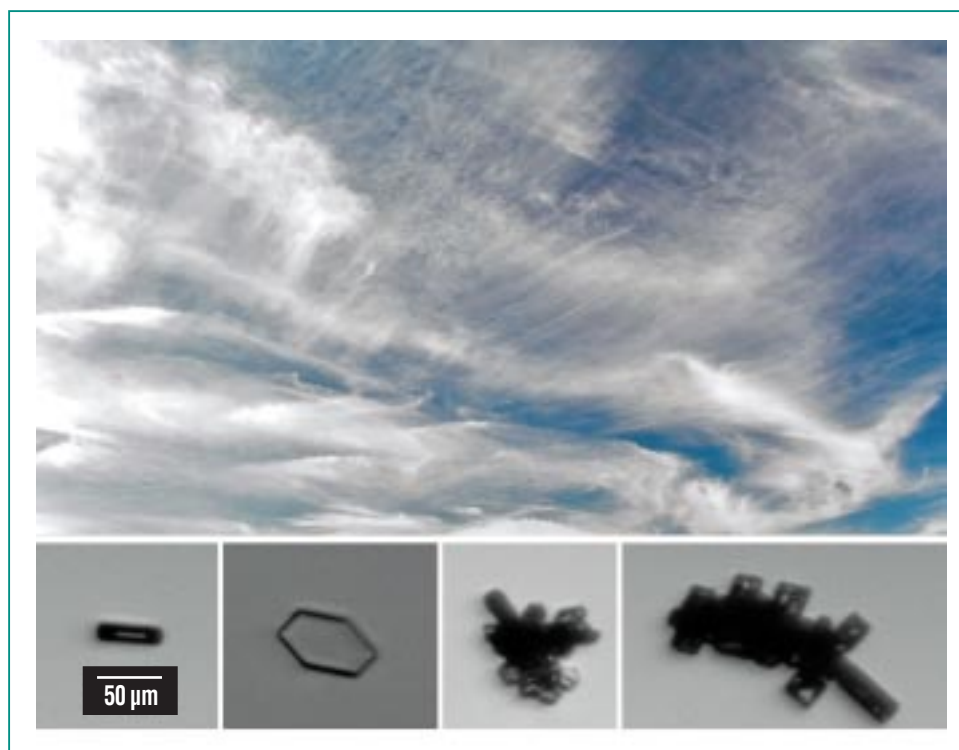


Abb. 2: Einige Bilder von Eiskristallen, die bei der Simulation von Zirruswolken in AIDA mit dem ultraschnellen Mikroskop aufgenommen wurden. Oben ist die typische federartige Struktur von Zirren zu erkennen, der sie ihren Namen verdanken.

Abb. 3 schematisch zusammengefasst:

So genannte homogene Eisbildung in Schwefelsäuretröpfchen erfordert im gesamten Temperaturbereich, in dem Zirren beobachtet werden, hohe Sättigungsverhältnisse S_{Eis} zwischen 1,5 und 1,7.

In Mischpartikeln aus Ruß und Schwefelsäure erfolgt heterogenes Immersionsgefrieren schon im mittleren Sättigungsbereich um 1,4.

Wüstenstäube sind besonders wirksame heterogene Eiskeime, weil sie schon bei $S_{\text{Eis}} \sim 1,1$ zur Zirrenbildung beitragen.

Aus diesen Ergebnissen lässt sich folgern, dass eine Erhöhung des Anteils heterogener Eiskeime in Höhen über 6 km die Häufigkeit der Zirrusbewölkung erhöht, da niedrigere Übersättigungen früher und damit öfter erreicht werden. Außerdem ist die Konzentration heterogener Eiskeime deutlich kleiner als die der Lösungströpfchen, weshalb heterogen gebildete Zirren eine geringere Zahl, dafür aber größere Eiskristalle aufweisen. Solche durch anthropogene Einflüsse bedingte Veränderungen wirken sich direkt auf die Strahlungseigen-

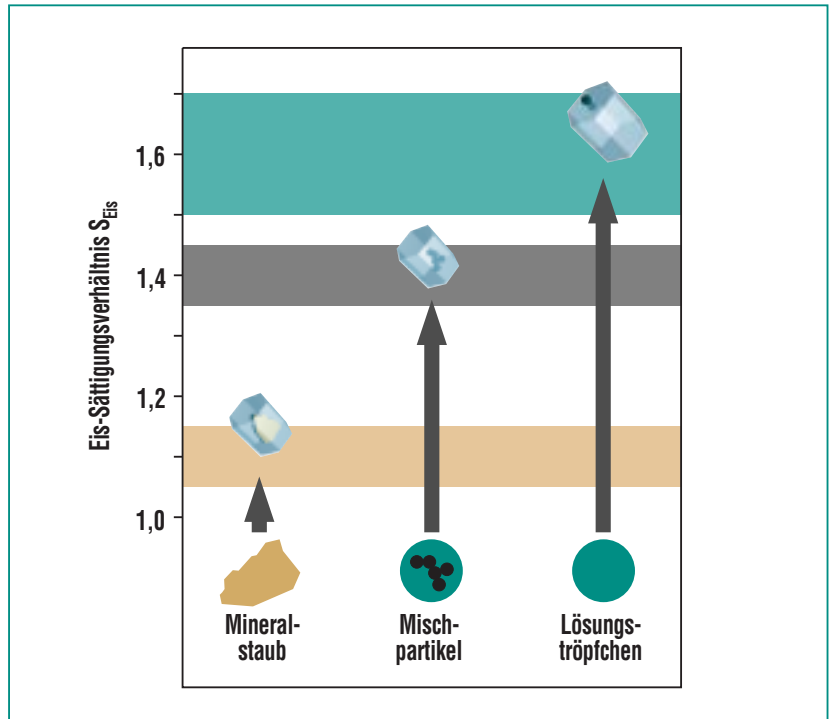


Abb. 3: In AIDA ermittelte Bereiche von Eis-Sättigungsverhältnissen, bei denen verschiedene Aerosolarten als Eiskeime aktiv werden.

schaften der Zirren aus, weil wenige große Eiskristalle weniger Sonnenlicht reflektieren als viele kleine.

Die in AIDA-Experimenten gewonnenen Erkenntnisse fließen in Klimamodelle ein, um die Vorhersagegenauigkeit von globalen Klimsimulationsmodellen zu ver-

bessern und den Effekt anthropogener Aerosolemissionen auf das Klima genauer abzuschätzen.

Literatur

- [1] U. Schumann, C. R. *Physique* 6, 549-565, 2005
- [2] O. Möhler, K. D. Beheng, *Nachrichten* 1-2, 68-72, 2003