

Wie Flocken verdampfen

Neue theoretische Betrachtungen erlauben es, die Sublimation von Eiskristallen besser zu verstehen.

Manuel Baumgartner und Miklós Szakáll

Wolken beeinflussen, wie Strahlung zur Energiebilanz von Erde und Atmosphäre beiträgt. Gerade Eiskristalle können wärmend [1] oder kühlend [2] wirken – abhängig davon, welche Form die Eiskristalle in der Wolke haben. Diese Form variiert während des Lebenszyklus einer Wolke. Die Eiskristalle bilden sich, wachsen oder verdampfen. Um die Vorgänge besser zu verstehen, haben Physiker der Universität Amsterdam im Labor beobachtet, wie Eistropfen sublimieren [3]. Ihre Studie leistet einen Beitrag dazu, den genauen Sublimationsprozess zu klären.

In Wolken bilden sich Eiskristalle wohl auf mindestens zwei Wegen: Entweder gefrieren kleinste Tropfen, oder Eis entsteht an Spurenstoffen wie Staub. Falls genügend Feuchte um den Eiskristall vorhanden ist, diffundieren weitere Wasserdampfmoleküle zu seiner Oberfläche und lassen den Kristall nach ihrer Kondensation anwachsen. Bei zu geringer Feuchte verdampft dagegen der Kristall. Seine spezielle Form hängt neben der Feuchte auch von der Umgebungstemperatur ab [4]. Das zugehörige Diffusionsproblem beschreibt die Laplace-Gleichung in der Form [3]

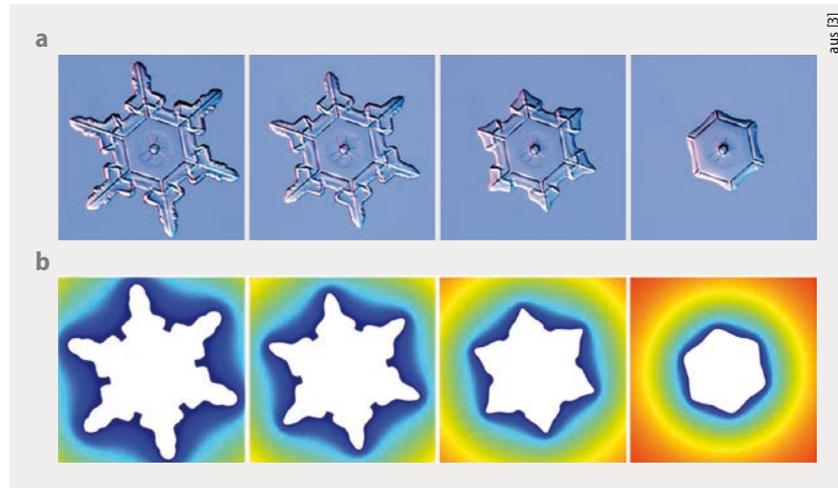


Abb. 1 Bei einer verdampfenden Schneeflocke bilden sich die Spitzen immer mehr zurück. Das zeigt sich bei der Beobachtung im Labor (a) und der Simulation (b), welche die Sättigungsdampfdrucke ρ_{sat} (blau) und die verschwindende Dichte $\rho = 0$ (rot) illustriert.

$$\Delta\rho(x) = 0, v_n = -\frac{D}{\rho_{\text{Eis}}} \vec{n} \cdot \nabla\rho(x)|_r$$

$$\rho|_r = \rho_{\text{sat}}(T_s) \text{ und } \rho|_{\infty} = \rho_{\infty}. \quad (1)$$

Dabei bezeichnet $\rho(x)$ die Dichte des Wasserdampfs in der Luft am Punkt x , r den Rand des Eiskristalls, $\rho_{\text{sat}}(T_s)$ die Sättigungswasserdampfdrucke bei der Temperatur T_s an der Eisoberfläche, ρ_{∞} die Wasserdampfdrucke weit weg vom Eiskristall, v_n die Geschwindigkeit, mit der sich der Rand durch

Kondensation oder Verdampfung bewegt und D die Diffusionskonstante. Ist der Wert der Wasserdampfdrucke ρ nahe der Oberfläche größer als der Wert der dortigen Sättigungsdampfdrucke $\rho_{\text{sat}}(T_s)$, wächst der Eiskristall. Im umgekehrten Fall verdampft er. Beides passiert an den Spitzen besonders schnell. Numerische Lösungen der Gleichung lassen sich mit Beobachtungen vergleichen (**Abb. 1**): Die einzelnen Spitzen des Kristalls verändern sich nicht unabhängig. Das erschwert eine exakte Beschreibung des Vorgangs.

Um dieses Problem zu vereinfachen, wurde in den aktuellen Experimenten ein flüssiger Wassertropfen auf ein Substrat aufgebracht [3], der nach kurzer Zeit gefriert und aufgrund der Expansion des Wassers eine einzelne Spitze ausbildet (**Abb. 2**). Diese bildet sich wie erwartet schnell wieder zurück. Mithilfe einer approximativen Lösung von Gleichung (1) wurde ein Zusammenhang gefunden, welcher die Krümmung κ der Spitze in Abhängigkeit von der Zeit t beschreibt:

$$\kappa(t) = A(t + t_0)^{-1/2}. \quad (2)$$

Kurzgefasst

Fehlfunktion als Glücksfall

Forscher des Bremer ZARM und der TU München konnten die gravitative Rotverschiebung mit Hilfe zweier Galileo-Satelliten viermal genauer bestimmen. Diese erreichten nur eine elliptische Umlaufbahn, auf der sie ihre Höhe um 8700 km ändern, weil die Oberstufe einer Soyuz-Rakete nicht richtig funktionierte. Die Atomuhren an Bord der Satelliten laufen je nach Abstand zur Erde verschieden schnell. Aus dem Unterschied ergibt sich die Rotverschiebung, die für Navigation, Erdvermessung und die internationale Atomzeit wichtig ist.

S. Hermann et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 231102 (2018)

Katalog mit elf Einträgen

Die erste Beobachtung von Gravitationswellen im Herbst 2015 sorgte für eine Sensation. Mittlerweile ist der Nachweis vom Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher fast schon Routine: Insgesamt zehn solcher Ereignisse wurden aktuell ausgewertet, was die LIGO- und VIRGO-Kollaborationen veranlasste, einen ersten Katalog zu veröffentlichen. Dieser enthält auch das bisher nur einmal detektierte Ereignis eines Mergers zweier Neutronensterne. Der Katalog listet die Parameter der Ereignisse auf, beispielsweise die Massen der Konstituenten.

LIGO Scientific Coll. und VIRGO Coll., arXiv:1811.12907 (2018)

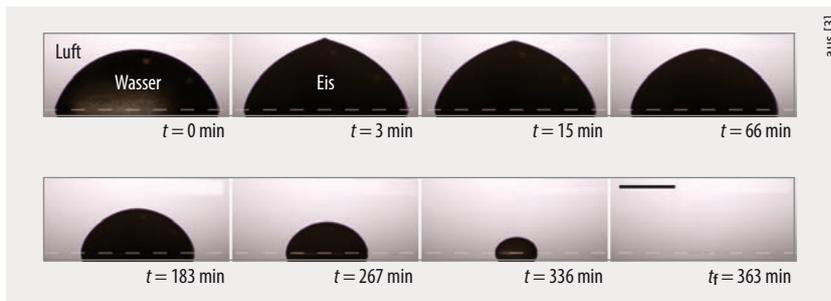


Abb. 2 Ein flüssiger Wassertropfen (schwarz) gefriert drei Minuten nach dem Aufbringen auf ein Substrat (weiße gestrichelte Linie). Dabei bildet sich eine Spitze, an der beim anschließenden Verdampfen des Eistropfens die Verdampfungsrate größer ist als an anderen Stellen der Oberfläche.

Die Konstante A hängt vom Eistropfen ab, t_0 beschreibt eine zeitliche Verschiebung durch den Anfangszustand des Eistropfens. Der beobachtete zeitliche Verlauf der Krümmung stimmt erstaunlich gut mit diesem einfachen Zusammenhang überein (**Abb. 3**).

Der genaue Kontaktwinkel zwischen Eistropfen und Substrat hängt von den Eigenschaften des Substrats ab, nähert sich während des Verdampfens jedoch stets einem Winkel von 90° an (**Abb. 2**). Auch für den Radius und die Höhe des Tropfens ließ sich der zeitliche Verlauf gut beschreiben, wenn die Form des Tropfens als Ellipsoid genähert wurde [3]. Die dann bekannten analytischen Lösungen von Gleichung (1) stimmen gut mit den Beobachtungen überein. Insbesondere zeigt sich eine etwas stärkere Verdampfungsrate, solange sich der Kontaktwinkel von 90° unterscheidet.

Wie gut Beobachtung und Modellgleichungen übereinstimmen, er-

staunt aus zwei Gründen: Einerseits ist der genaue Mechanismus, wie sich Wassermoleküle an der Eiskristalloberfläche verhalten, nicht bekannt [4]. Die realen Randbedingungen für die Oberfläche dürften deutlich komplizierter sein, als in der Laplace-Gleichung angenommen. Andererseits vernachlässigt das Modell weitere mögliche Zeitabhängigkeiten, die Änderung des Sättigungsdampfdrucks durch die Oberflächenkrümmung (Kelvin-Effekt), molekularkinetische Effekte an der Oberfläche oder Temperaturänderungen beim Wachsen oder Verdampfen. Diese Effekte spielen vor allem für sehr kleine Eiskristalle eine wichtige Rolle.

Grundsätzlich erkannte schon Maxwell, dass das Anwachsen oder Verdampfen eines Eiskristalls Parallelen zum elektrischen Feld um einen geladenen Leiter aufweisen sollte, wenn die Laplace-Gleichung beide Situationen beschreibt [5]. Ihm war bekannt, dass die elektrische Feldstärke in der Umgebung eines geladenen Leiters umso größer ausfällt, je spitzer seine Oberfläche ist. Die Schlussfolgerung, dass bei einer nahezu konstanten Wasserdampfdichte in der Umgebung des Eiskristalls die Verdampfungsrate an der Spitze besonders groß ist, ließ sich nun erneut bestätigen. Zudem konnten neue Beschreibungen für die Krümmung und den Radius des Eistropfens abgeleitet werden.

Damit ist ein weiterer Schritt getan, um die komplizierten Vorgänge eines verdampfenden Eiskristalls zu verstehen. Nun gilt es, dies auch auf den Fall eines Schneekristalls zu übertragen, dessen Eisspitzen während des

Verdampfens interagieren. Dann lässt sich beispielsweise die Frage angehen, wie Eis- und Schneekristalle in Wolken entstehen und wachsen. Darüber ist immer noch wenig bekannt, obwohl feststeht, dass Eis in der Atmosphäre eine sehr wichtige Rolle spielt. Es gibt zum Beispiel Hinweise darauf, dass der meiste Niederschlag über den Kontinenten unter Beteiligung von Eis entsteht [6], selbst wenn er in flüssiger Form als Regen am Boden ankommt.

Die Resultate haben weitere Anwendungen, da in der theoretischen Herleitung an keiner Stelle vorausgesetzt war, dass es sich um einen Eiskristall handelt, sondern lediglich ein quasi-stationärer Diffusionsprozess angenommen wurde. Als Beispiel kann man sich den Auflösungsprozess einer Arzneipille vorstellen [3]. Exponierte Spitzen, die auch bei einer annähernd ellipsoidenförmigen Pille auftreten können, sollten sich beim Auflösen als Erstes zurückbilden. Hier könnten allerdings noch zusätzliche Terme in der Laplace-Gleichung nötig sein, beispielsweise die Zeitabhängigkeit oder ein Konvektionsterm.

- [1] IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK und New York, USA (2013)
- [2] Y. Hong und G. Liu, J. Clim. **28**, 3880 (2015)
- [3] E. Jambon-Puillet, N. Shahidzadeh und D. Bonn, Nat. Commun. **9**, 4191 (2018)
- [4] K. G. Libbrecht, Engineering and Science **64**(1), 10 (2001)
- [5] J. C. Maxwell, Diffusion, in: W. D. Niven (Ed.), The Scientific Papers of James Clerk Maxwell, Vol. 2, Reprint, Cambridge University Press, Cambridge, UK (2011), S. 625
- [6] J. Mülmenstädt, O. Sourdeval, J. Delanoë und J. Quaas, Geophys. Res. Lett. **42**, 6502 (2015)

Autoren

Dr. Manuel Baumgartner, Zentrum für Datenverarbeitung, Universität Mainz, Anselm-Franz-von-Bentzel-Weg 12, 55128 Mainz;

Dr. Miklós Szakáll, Institut für Physik der Atmosphäre, Universität Mainz, Becherweg 21, 55128 Mainz

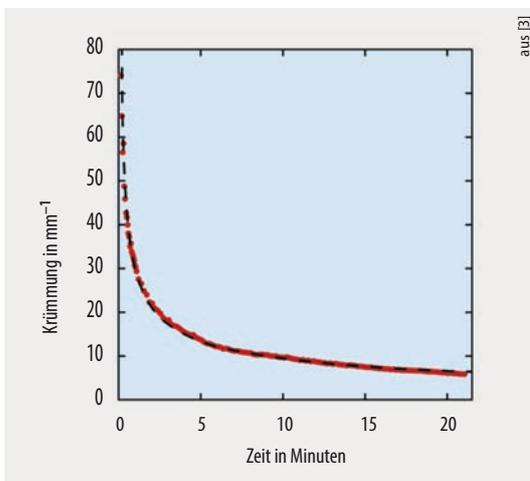


Abb. 3 Der zeitliche Verlauf der Krümmung der Oberfläche des Eistropfens folgt sehr gut einer Hyperbel.