

## Wärmebilder gefrierender Nieseltröpfchen

Untersuchung der Prozesse bei der Eisbildung

Um die Prozesse der Eisbildung in der Atmosphäre besser zu verstehen, führten Wissenschaftler des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) Experimente mit gefrierenden Wassertropfen durch. Sie nutzten dazu eine hochauflösende Thermografiekamera vom Typ ImageIR® 7340 sowie eine Hochgeschwindigkeitskamera, um Temperaturänderungen und Formveränderungen während des Gefrierens präzise zu dokumentieren. Ziel war es, Mechanismen zu analysieren, bei denen gefrierende, nieselgroße Wolkentröpfchen zerbrechen und dadurch Eisfragmente freisetzen, die das Gefrieren weiterer Tropfen anstoßen können (sogenannte Sekundäreisbildung).

Karlsruher Institut für Technik (KIT)  
 Institut für Meteorologie und  
 Klimaforschung  
 Atmospheric Aerosol Research (IMK-AAF)

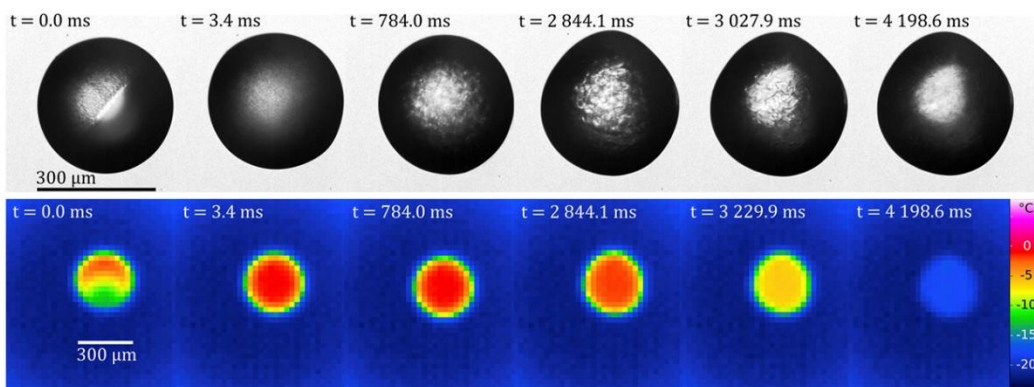
<https://www.imk-aaf.kit.edu/>

InfraTec-Thermografiesystem:  
 ImageIR® 7340 Wärmebildkamera

**Alle Bilder:** © American Meteorological Society. Verwendung mit Erlaubnis.

Die Versuche fanden in einer elektrodynamischen Falle statt, in der Tropfen unter kontrollierten Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftströmung) schwebend untersucht wurden. Die Eisbildung wurde durch gezieltes Einleiten feiner Eispartikel angeregt.

Für die Messung der Tropfenoberflächentemperatur während des Gefrierens kam eine MWIR-Thermografiekamera vom Typ ImageIR® 7340 mit 50 mm-Objektiv, Close-up und Zwischenringen (2-fach Vergrößerung) zum Einsatz. Die Kamera bietet im Temperaturbereich von (-30 ... +30) °C eine Genauigkeit von  $\pm 1$  K und eine Bildrate von 287 Bildern/s. Die Dicke der emittierenden Schicht lag bei 36  $\mu\text{m}$  (Wasser) bzw. 24  $\mu\text{m}$  (Eis), sodass jeweils nur die äußerste Tropfenschicht erfasst wurde.

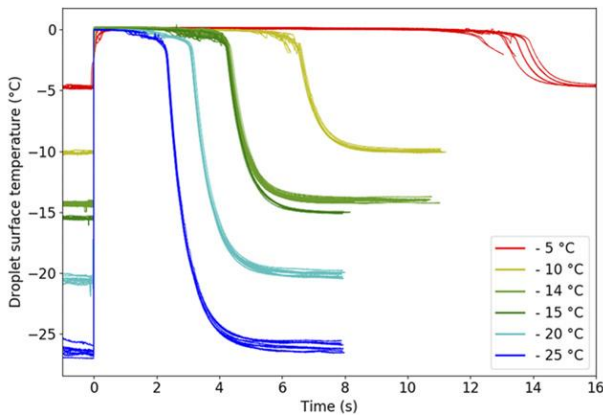


**Abb. 1:** Hochgeschwindigkeits-Videoaufnahme und (unten) IR-Videoaufnahme eines gefrierenden Tropfens ( $d = 3,44$  mm) bei  $-20$  °C in ruhender Luft. Die Zeitangabe bezieht sich auf Millisekunden nach der Eiskeimbildung. Im unteren Bild ist die Oberflächentemperatur farblich gekennzeichnet.

Da Wasser und Eis im relevanten Spektralbereich keine idealen Schwarzkörper sind und die Tropfenform die Untersuchungen verfälschen kann, konzentrierten sich die Messungen auf den zentralen Bereich des Tropfens. Die thermografischen Messungen wurden mit den Videoaufnahmen synchronisiert, um Temperatur- und Formänderungen exakt abzugleichen.

## Wärmebilder gefrierender Nieseltröpfchen

Untersuchung der Prozesse bei der Eisbildung



**Abb. 2:** Oberflächentemperatur der Tröpfchen während des Gefrierens in ruhender Luft bei verschiedenen Umgebungstemperaturen (Versuchstyp A). Der Zeitpunkt Null ist auf den Moment der Keimbildung festgelegt.

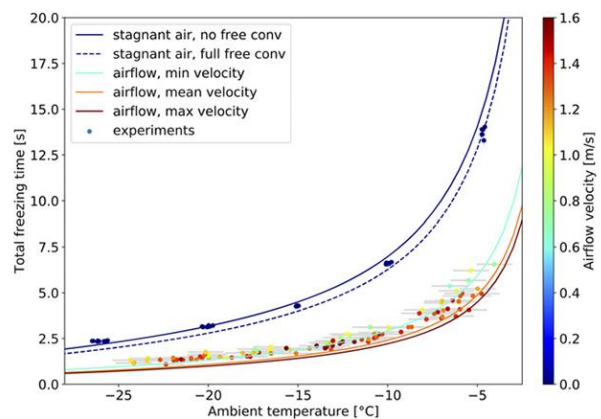
Die Messungen zeigten drei klar unterscheidbare Phasen (s. Abb. 2):

1. **Initialphase:** Direkt nach der Initialisierung des Gefrierprozesses durch externe Eispartikel erwärmt sich der Tropfen auf die Schmelztemperatur von Eis (ca. 0 °C), bedingt durch die bei der Kristallisation freigesetzte latente Wärme.
2. **Kristallisationsphase:** Während des Fortschreitens der Kristallisation stabilisiert sich die Temperatur auf diesem konstanten Niveau, bis das gesamte Flüssigwasser erstarrt ist.
3. **Abkühlphase:** Nach dem Abschluss der Kristallisation kühlt der Tropfen exponentiell auf die Umgebungstemperatur ab.

### Modellierung des Abkühlprozesses

Zur Beschreibung der Vorgänge stellten die Wissenschaftler ein einfaches Wärme- und Stoffübertragungsmodell auf, das sowohl die vollständige Kristallisation (Phase 2) als auch die anschließende Abkühlung auf Umgebungstemperatur (Phase 3) beschreibt. Dieses Modell berücksichtigt die Freisetzung latenter Kristallisationswärme, die Wärmeleitung im Inneren des Tröpfchens, Wärmeübertragung an die Umgebung durch Wärmeleitung (Wärmediffusion), freie und erzwungene Konvektion sowie Eissublimation an der Tropfenoberfläche.

Die Abkühlung des vollständig gefrorenen Tropfens auf Umgebungstemperatur (Phase 3, Kühlmodell) wurde ausgehend von einer festen Eiskugel am Schmelzpunkt und unter Umgebungsdruck berechnet. Insgesamt stimmt die modellierte Oberflächentemperatur sehr gut mit den gemessenen Werten überein.



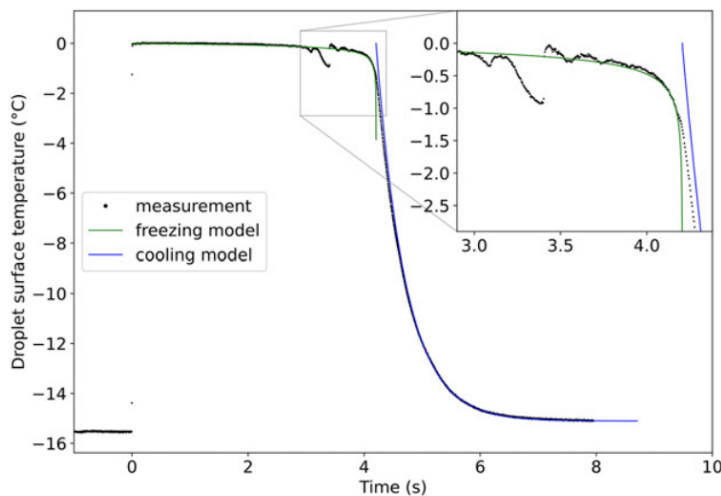
**Abb. 3:** Vergleich der modellierten (Linien) mit den gemessenen (Punkte) Gesamtgefrierzeiten von Wassertropfen mit  $d = 345 \pm 1 \mu\text{m}$  (im Ruhezustand) und  $d = 326 \pm 6 \mu\text{m}$  (im Luftstrom) in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur. Alle Markierungen und Linien sind entsprechend der Luftströmungsgeschwindigkeit farblich gekennzeichnet. Die durchgezogenen Linien für das Gefrieren bei Luftströmung wurden für drei im Experiment verwendete Grenzfälle berechnet: minimale, mittlere und maximale Luftströmungsgeschwindigkeit von 0,6, 1,2 bzw. 1,6 m/s.

## Wärmebilder gefrierender Nieseltröpfchen

### Untersuchung der Prozesse bei der Eisbildung

#### Untersuchung von Druckentlastungsereignissen (Pressure Release Events, PREs)

In den Hochgeschwindigkeitsaufnahmen wurden Ereignisse wie Zersplitterung oder Blasenbildung dokumentiert, die stets mit einer langsamen Temperaturabsenkung und plötzlichem Temperaturanstieg einhergingen. Dies deutet auf eine druckinduzierte Gefrierpunktniedrigung hin, gefolgt von schnellem Druckabfall durch Rissbildung in der Eisschale (siehe Detailvergrößerung in Abb. 4).

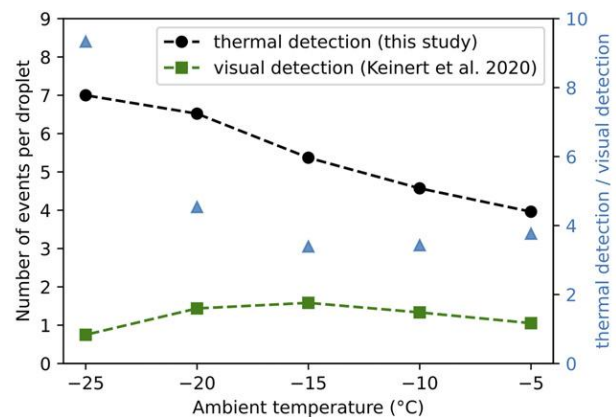


**Abb. 4:** Vergleich der modellierten Oberflächentemperatur in zwei Schritten (grüne und blaue Linie) mit der gemessenen Oberflächentemperatur (schwarze Punkte) eines gefrierenden Tropfens bei  $-15\text{ °C}$  in ruhender Luft ( $d = 346\text{ }\mu\text{m}$ ). Im Modell wurde eine mittlere Nusselt-Zahl von  $0,55N_{\text{no\_free\_convection}} + 0,45N_{\text{full\_free\_convection}}$  verwendet, um die tatsächliche Gefrierzeit zu erreichen.

Die Thermografie erwies sich dabei als deutlich empfindlicher als die Hochgeschwindigkeits-Video-technik, denn sie erfasste drei- bis neunmal mehr PREs (s. Abb. 5).

Im freien Fall traten PREs etwa dreimal häufiger auf als in ruhender Luft, was auf den durch Luftströmung beschleunigten Gefrierprozess und erhöhten Innendruck zurückzuführen ist. Höhere Temperaturen führten zu stabileren Eishüllen, während schnelles Gefrieren sprödere Strukturen erzeugte.

Die Studie verdeutlicht, dass Thermografie nicht nur exakte Temperaturverläufe an gefrierenden Tropfen liefern kann, sondern auch eine wesentlich höhere Detektionsrate für druckbedingte Ereignisse (PREs) bietet. Da diese Prozesse zur Bildung sekundärer Eiskristalle beitragen, sind sie entscheidend für das Verständnis der Eis- und Niederschlagsbildung in Mischphasenwolken.



**Abb. 5:** Vergleich verschiedener Methoden zur Erfassung der Anzahl von Druckentlastungsereignissen. Die linke Achse zeigt die durchschnittliche Anzahl der in dieser Studie mittels Wärmebildgebung erfassten PREs pro Tröpfchen (schwarze Kreise) sowie die durchschnittliche Anzahl der in Keinert et al. (2020) mittels Hochgeschwindigkeitsvideoanalyse beobachteten SIP-Ereignisse (grüne Quadrate). Die blauen Dreiecke (rechte Achse) zeigen das Verhältnis der beiden verglichenen Methoden.

## Wärmebilder gefrierender Nieseltröpfchen

Untersuchung der Prozesse bei der Eisbildung

Veröffentlicht in:

Kleinheins, J., Kiselev, A., Keinert, A., Kind, M., and Leisner, T. (2021): Thermal Imaging of Freezing Drizzle Droplets: Pressure Release Events as a Source of Secondary Ice Particles, Journal of the Atmospheric Sciences, 78, 1703-1713, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/78/5/JAS-D-20-0323.1.xml>