

Technischer Schnee und der Mpemba-Effekt

Schneekanonen und Schneilanzen beruhen auf interessanten Phänomenen der Wassertröpfchenphysik und der Meteorologie. Technischer Schnee kann paradoxerweise in kleinen Mengen auch mit heissem Wasser erzeugt werden. Die in kalten Gegenden beliebten Experimente werden meist als Beispiele des Mpemba-Effektes beschrieben – zu Unrecht, denn der seit Aristoteles vermutete Effekt ist eine Illusion.

Technischer Schnee wird verwendet, um als Folge des Klimawandels sterbende Wintersportgebiete noch einige Zeit am Leben zu erhalten. Schneekanonen (Abb. 1) versprühen Wasser, das mit mehreren Atmosphären Überdruck durch ringförmig angebrachte Düsen gepresst wird. Um den Gefrierprozess zu beschleunigen und die entstehenden Eiskügelchen auf eine grössere Fläche zu verteilen, wird mit leistungsfähigen Ventilatoren ein Luftstrahl erzeugt, der die Wassertropfen und Eiskügelchen mitreisst.

Schneilanzen verzichten auf diesen energieintensiven Ventilator und schleudern Wassertröpfchen mit Hilfe hochkomprimierter Luft über die zu beschneie Fläche. Beim Austritt aus der Düse dehnt sich die Luft aus und kühlt sich dabei ab, was den Gefriervorgang beschleunigt. Bei beiden Systemen kann das zu versprühende Wasser zur Erhöhung der Effizienz vorgekühlt und mit chemischen Mitteln versetzt werden, welche die Gefriertemperatur erhöhen.

Verdunstungskühlung – eine alltägliche Erfahrung

Nasse Haut fühlt sich kälter an als trockene, und dies umso mehr, je stärker der Wind weht. Um ein Gramm Wasser zu verdunsten, werden 539 Kalorien benötigt (die sog. Verdampfungswärme). Da der Wärmekontakt zwischen der Haut und dem Wasserfilm besser ist als zwischen dem Wasserfilm und der Luft, wird die Verdampfungswärme zum grössten Teil aus der Haut bezogen, die sich dabei abkühlt. Mit Hilfe des Energieerhaltungsgesetzes kann die Abkühlung

exakt berechnet werden. Die kälteste durch Verdunstung von Wasser entstehende Temperatur wird Feuchtkugelttemperatur (oder kurz Feuchttemperatur, engl. *wet bulb temperature*) genannt und in Tabellen aufgelistet. Sie hängt von der normalen Temperatur (auch Trockentemperatur genannt) und der Luftfeuchte ab (Tab. 1 und Abb. 2).

Feucht- und Trockentemperaturen sind in gesättigter Luft gleich, weil bei 100 Prozent Luftfeuchte kein Wasser verdunstet werden kann. Der Effekt ist bei trockener Luft am grössten: Bei 20°C und einer relativen Feuchte von 20 Prozent beträgt die Feuchttemperatur nur unangenehme 9,4°C. Dies ist jedoch nicht die Temperatur, die wir nach einem Bad bei Windstille spüren, sondern die niedrigste Temperatur, die bei starkem Wind entstehen kann. Deshalb hüllen wir uns sofort in trockene Tücher, wenn ein Wind weht.

Im Zusammenhang mit technischem Schnee sind Temperaturen um den Nullpunkt interessant: Bei 0°C und 20 Prozent beträgt die Feuchttemperatur -4,7°C. Trockene Luft ist also vorteilhaft für die Beschneieung. Der für das Erreichen der Feuchttemperatur notwendige Wind entsteht bei der Schneekanone durch den Ventilator und bei der Schneilanze durch den Luftstrahl aus der Hochdruckdüse.

Wichtig ist auch die ideale Tropfengrösse, die durch die Wahl der Düsen gesteuert werden kann.

		relative Feuchte in %				
		20	40	60	80	100
Temperatur in °C	20	9,4	12,5	15,2	17,7	20,0
	15	6,1	8,6	10,9	13,0	15,0
	10	2,6	4,7	6,6	8,3	10,0
	5	-0,9	0,7	2,2	3,6	5,0
	0	-4,7	-3,5	-2,2	-1,1	0,0
	-5	-8,6	-7,7	-6,8	-5,9	-5,0

Tab. 1: Feuchttemperaturen (°C) für verschiedene Temperaturen (°C) und Luftfeuchten (%). Entsprechende Rechner finden sich im Internet unter dem Stichwort Feuchtkugelttemperatur.



Abb. 1: Schneekanone (links) und Schneilanze (rechts) in Betrieb.

Die Tropfen sollen genügend Zeit haben, um bis in ihre Zentren zu gefrieren, damit sie nicht in flüssiger Form auf den Boden fallen und Glatteis bilden. Dafür sind kleine Tropfen günstig. Andererseits sollen sie genügend schnell fallen, um nicht durch Winde wegweht zu werden, was für grosse Tropfen spricht. Diese Überlegungen zeigen, dass ein Optimum gefunden werden muss. Nach dem Stoke'schen Fallgesetz für sphärische Tropfen ergibt sich eine Fallgeschwindigkeit von 4 Zentimetern pro Sekunde für Tropfen mit Durchmessern von 1 Millimeter (die Fallgeschwindigkeit ist proportional zum Quadrat des Durchmessers). Für den Fall über etwa 5 Meter brauchen solche Tropfen also rund 2 Minuten. Durch einen schwachen Wind von 1 Meter pro Sekunde werden sie um gut 100 Meter verfrachtet, was toleriert werden kann. Nach der Diffusionsgleichung findet der Temperatureausgleich in einem solchen Tropfen innerhalb von etwa 2 Sekunden statt. Da beim Gefriervorgang 80 mal mehr Wärme abgeführt werden muss als bei einer Abkühlung um ein Grad, muss etwa 20 mal mehr Zeit eingerechnet werden, wenn die Feuchttemperatur bei -4°C liegt, also rund 40 Sekunden. Die angenommenen 1-Millimeter-Tropfen sind also ein guter Kompromiss (Abb. 3).

Schnee aus heissem Wasser – Volkssport bei grosser Kälte

Statt mit Überdruckdüsen kleine Tropfen zu erzeugen, versuchen Leute bei Temperaturen unter etwa -30°C sehr heisses Wasser in die Luft zu werfen, um Schnee zu produzieren. Abb. 4 zeigt ein besonders eindrückliches Ergebnis dieser Bemühungen. Phy-

sikalisch geschieht dabei Folgendes: Ein kleiner Teil (viel weniger als 20 Prozent) des heissen Wassers verdampft und es entsteht eine mit Wasserdampf übersättigte Zone, in der innerhalb von Millisekunden feine Nebeltröpfchen entstehen. Diese gefrieren sofort zu kleinen Eiskriställchen, die langsam zu Boden fallen. Mit kaltem Wasser geschieht hingegen nichts Aussergewöhnliches.

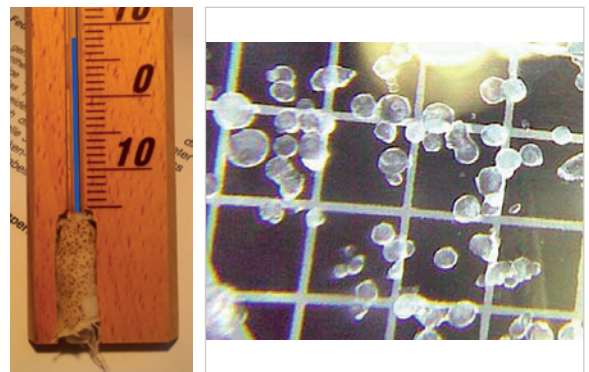


Abb. 2 (links): Zur Messung der Feuchttemperatur kann ein normales Thermometer verwendet werden, dessen Kugel mit einem befeuchteten Stofflappen umwickelt wird. Durch Schwenken des Thermometers oder mit Hilfe eines Ventilators wird Wind erzeugt, um die Verdunstung zu erhöhen. Kennt man die Trocken- und Feuchttemperatur, kann mit einem Rechner die relative Feuchte bestimmt werden.

Abb. 3 (rechts): Technischer Schnee aus Schneilanze auf einem 2-Millimeter-Raster. Die Tropfen haben eine sphärische Form mit Durchmessern von meist 0,4 bis 0,8 Millimetern. Sie sind etwas kleiner als die oben angenommenen 1-Millimeter-Tropfen und deshalb empfindlicher auf Wind-Verfrachtung. Schneilanzen erzeugen tendenziell kleinere Tropfen als Schneekanonen.

So weit ist alles verständlich. Überraschend ist jedoch die generelle Bezeichnung dieses Phänomens als Mpemba-Effekt, wie man dies in Tausenden von Internetseiten nachlesen kann. Der Mpemba-Effekt hat aber nichts mit Verdampfung und darauffolgender Kristallbildung zu tun!

Der vermeintliche Mpemba-Effekt

1963 machte der Gymnasiast Erasto Mpemba in Tanzania eine verblüffende Beobachtung: Seine heiße Glacé-Mischung gefror im Gefrierfach schneller als die bereits abgekühlten Produkte seiner Kameraden. Denis G. Osborne vom University College Dar es Salaam interessierte sich für die Beobachtung und publizierte, gestützt auf weitere Experimente, zusammen mit Mpemba den «Mpemba-Effekt» (Mpemba & Osborne 1969, 1979).

Ab 1995 entdeckten Chemiker und Physiker die merkwürdige Publikation und führten weitere Experimente durch. Ein Jahrzehnt später folgten mehrere Publikationen in seriösen Zeitschriften und es setzte ein Medienrummel ein (Radio, TV, Social Media, YouTube, das Stichwort Mpemba erzeugt heute 540 000 Hits im Internet), der den nie klar bewiesenen Effekt weltweit bekannt machte.

Recherchen ergaben, dass der gegen die Intuition verstossende Effekt – heisses Wasser gefriert schneller als kaltes – bereits früher von bekannten Wissenschaftlern vermutet wurde, z.B. durch Aristoteles (384-322 v.Chr.), Francis Bacon (1561-1626), René Descartes (1596-1650) und Joseph Black (1728-1799). Es lohnte sich deshalb, das Phänomen genauer zu untersuchen.

Die detaillierte Untersuchung von Burrige & Linden (2016) kam jedoch zum Schluss, dass kein Effekt nachgewiesen werden kann, wenn man alle Fehlerquellen berücksichtigt. Insbesondere muss die Verdampfung sorgfältig unterbunden werden. Da Osborne verstorben und der pensionierte Mpemba nicht auffindbar ist, wird die Frage nach der Ursache der seltsamen Beobachtung wohl nie ganz geklärt werden können. Eine plausible Erklärung ist, dass sich ein Gefäss mit heissem



Abb. 4: Durch eine schwingvolle Kreisbewegung wird das heiße Wasser aus einer Thermosflasche in die Luft geschleudert. Am linken und oberen Rand der Wolke sind die Kondensstreifen einzelner Wassertropfen deutlich zu erkennen.

Wasser in die in Gefrierfächern immer vorhandene Eisschicht einschmilzt und für einen guten thermischen Kontakt mit den Kühlelementen sorgt. Dadurch werden die Abkühlung und der Gefrierprozess beschleunigt.

Fritz Gassmann

Der Autor ist Physiker und arbeitete früher am Paul Scherrer Institut PSI in Villigen.

Literatur

Bacher M. & Draxler D. 2011. Entwicklung eines Prototyps zur Schneeerzeugung im Labor. IAN Report 137, Universität Wien: 66 S.

Burrige H. C. & Linden P. F. 2016. Questioning the Mpemba effect: hot water does not cool more quickly than cold. Nature Publishing Group, Sci. Rep. 37665: 31 p.

Lang T. 2009. Energetische Bedeutung der technischen Pistenbeschneigung und Potentiale für Energieoptimierungen. BfE-Projekt 102594: 33 S.

Mpemba E. B. & Osborne D. G. 1969. Cool? Physics Education 4 (3): 172-175.

Mpemba E. B. & Osborne D. G. 1979. The Mpemba effect. Physics Education 14 (7): 410-412.