

Künstlich rieselt der Schnee

Sie haben sich inzwischen über fast alle Skigebiete ausgebreitet und der moderne Wintersportbetrieb ist kaum noch ohne sie vorstellbar: Schneekanonen und ihre Verwandten.

Skiläufer und Snowboarder erwarten – unabhängig von den tatsächlichen Niederschlägen – selbstverständlich weiße Pisten, wenn sie in Urlaub fahren, und viele Wintersportveranstaltungen müssen ebenfalls auf den gemachten Schnee zurückgreifen. Dabei wird sich nach einer Studie des UN-Umweltprogramms UNEP der Schneemangel in den nächsten Jahrzehnten massiv verschärfen.¹⁾

Aber guten Schnee künstlich herzustellen ist nicht unbedingt einfach. Schnee ist nicht gleich Schnee. Wer einmal in tiefen, frischen Pulverschnee versackt und ein andermal auf verharschtem Schnee dahin geschlittert ist, kann ein Lied davon singen. Wer nur ein wenig aus dem Fenster schaut, wenn es schneit, merkt zudem, dass die Schneeflocken oft in nur wenigen Minuten ihr Erscheinungsbild völlig verändern. Obwohl sich schon Aristoteles Gedanken darüber machte, wie Schnee entsteht, ist die Physik hinter den Schneekristallen noch nicht vollständig verstanden.

1) UNEP-Pressemitteilung 2003/68 vom 2. Dezember 2003

2) Die Fotografien der Schneekristalle stammen aus: K. G. Libbrecht und P. Rasmussen, *The Snowflake: Winter's Secret Beauty*, Voyageur Press, Stillwater 2003, www.snowcrystals.com

3) Was etwa die Entstehung der feinen Verästelungen einer Sternform bestimmt, ist noch nicht genau ergründet. Allerdings muss beim Phasenübergang am Gefrierpunkt die Umwandlungswärme (latente Wärme) abgeführt werden, was durch die größere Oberfläche einer solchen Geometrie begünstigt wird.



Bei Schneemangel helfen Schneekanonen nach. (Fotos: Technoalpin)

dieser Schneekristall, indem sich immer mehr Luftfeuchtigkeit anlagert und gefriert. Während dabei alle Schneekristalle die gleiche bekannte hexagonale Symmetrie besitzen, die sich aus der Anordnung der Wassermoleküle im Eis ergibt, sehen trotzdem keine zwei Kristalle gleich aus.²⁾ Die Art des Kristallwachstums hängt zu jeder Zeit sehr empfindlich von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab (Abb. links). Während seines Falls durchwandert ein Kristall nun unterschiedlichste Atmosphärenschichten, sodass seine Gestalt, die oft ein Mix aus Stern-, Prisma- und Plättchenformen ist, schließlich eine Art Autobiografie darstellt.³⁾

Schnee auf Bestellung

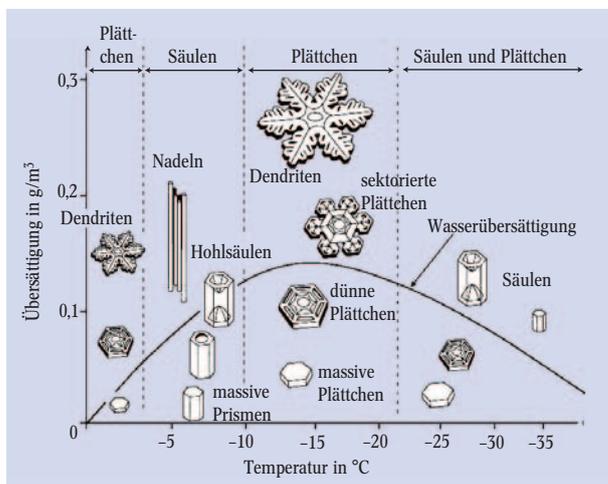
Was in der Natur derart einfach und selbstverständlich abläuft – so dachte man sich schon in der Mitte des letzten Jahrhunderts – sollte doch ohne Weiteres auch zu imitieren sein. Ein früherer Ansatz war, der Natur etwas nachhelfen zu wollen, indem man mit Silberjodidkristallen den Wolken die fehlenden Kristallisationskeime liefert und so den Schneefall auslöst. Die Methode scheiterte nicht nur an ihrem mäßigen technischen Erfolg, sondern auch an Zwistigkeiten benachbarter Skigebiete, wer denn nun wem den Schnee dieser Wolken klaue. Seitdem ist man zu lokalen Methoden übergegangen, die allesamt mit Wasser, Luft und Energie arbeiten, allerdings mit leicht variierenden Techniken.

Das simpelste, aber kaum noch genutzte Prinzip ist die Eiskanone, die lediglich wie ein Eisschrank Wasser gefrieren lässt, es dann zerstößt und schließlich mit Druckluft auf die Piste bläst. Auf diese Weise

ist man nur mäßig von den Außentemperaturen abhängig. Aber die Methode ist weder effizient noch leistungsfähig und es ist umstritten, wie gut sich der produzierte „Schnee“, der ja vielmehr aus Eissplittern statt Schneekristallen besteht, zum Skifahren eignet.

Andere Techniken, wie die Druckluftkanone, die Propellerkanone und die sog. Schnei-Lanze, versuchen hingegen den Prozess der natürlichen Entstehung des Schneekristalls zu imitieren. Einzelne Wassertropfen werden auf unterschiedliche Weise in die Luft geblasen und sollen auf ihrem Weg zum Pistenboden zu Eiskristallen ausfrieren. Allerdings ist die Zeit zwischen Austritt und Landung des Wassertropfens relativ kurz verglichen mit dem oft kilometerlangen Auf und Ab eines natürlichen Schneekristalls durch die Atmosphäre, und auch der höhere Luftdruck am Erdboden und die im Durchschnitt höhere Temperatur erschweren die Aufgabe.

In der Druckluftkanone wird Wasser mit Luft in einer Kammer vermischt und über eine Düse bei etwa 5 bis 10 bar in die Atmosphäre geschleudert. Auf seiner Flugbahn wird dem einzelnen Tropfen dann durch die Expansion der Luft die Wärme entzogen, sodass er gefrieren kann. Die „Schneeleistung“ hängt damit direkt vom Anfangsdruck des Luft-Wassergemisches ab, der in zentralen Kompressorstationen erzeugt und über Druckluftleitungen zu den Geräten an der Piste geleitet wird. Eine Druckluftkanone kommt zwar ohne rotierende Teile aus und ist relativ unempfindlich gegenüber den atmosphärischen Bedingungen, speziell auch gegen Wind, aber wegen



Je nach Temperatur und Luftfeuchtigkeit unterscheiden sich die Formen der Schneekristalle. (Quelle: K. G. Libbrecht/ www.snowcrystals.com)

Eigentlich ist es ja nur Wasser, das gefrieren muss – genauer gesagt die kondensierte Luftfeuchtigkeit. In der Natur geschieht das, wenn warme, feuchte Luft sich abkühlt und nicht mehr so viel Feuchtigkeit halten kann. Bei ausreichend tiefen Temperaturen gefrieren dann die winzigen Wassertropfchen an Kondensationskeimen, wie z. B. Ruß- und Staubpartikeln, die überall in der Luft vorkommen. Auf seinem Weg zum Boden wächst

des sehr hohen Energieverbrauchs der Kompressoren und der im Vergleich geringen Schneileistung sind inzwischen nur noch wenige solcher Systeme im Betrieb. Hinzu kommt auch die hohe Lärmbelastung, die die Verwendung in der Nähe von Wohngebieten unmöglich macht.

Mit Wasser, Luftdruck und Kanone

Ohne den großen Energiebedarf für Druckluft kommt die Propellerkanone aus, deren Herzstück eine bis zu einem Meter große Turbine ist. Sie besitzt zwar auch einen kleinen, lokalen Kompressor, dessen Druckluft mit ein wenig Wasser gemischt und dann in „Nukleatoren“, kleinen Düsen, zur Expansion gebracht wird. Diese winzigen Tropfen, die sofort gefrieren, bilden aber nur die Keime der späteren Eiskristalle und beschleunigen deren Kristallisationsprozess. Größere Düsen, die um die Turbine herum angeordnet sind, versprühen Wassertropfen, die – mit den Gefrierkeimen gemischt – im Luftstrom des Propellers auf einer langen Flugbahn ausfrieren können. Mit einer Turbine lassen sich so bei relativ geringem Energieaufwand Wurfweiten bis zu 50 m und auch deutlich größere Schneemengen als bei der Druckluftkanone erreichen. Die Größe der Wassertropfen muss allerdings jeweils den atmosphärischen Bedingungen angepasst werden: Sind die Tropfen zu groß für die herrschenden Temperaturen, reicht die Zeit nicht zum Ausfrieren; sind sie zu klein, dann verdunsten sie, bevor sie den Boden erreichen.

Die richtige Größe hängt somit nicht nur von der Temperatur ab, sondern auch von der Luftfeuchtigkeit. Man spricht daher bei der Schneeerzeugung von der „Feuchtkugeltemperatur“. Sie gibt im weitesten Sinn eine vom Schneekristall bzw. dem Wassertropfen „gefühlte“ Temperatur wieder. Bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit könnte ein Tropfen nur aufgrund der Temperaturdifferenz und der dadurch an die Umgebung abgeleiteten Wärme gefrieren, also nur unter 0 °C. Bei geringerer Luftfeuchtigkeit wird aber auch ein Teil des Tropfens verdunsten, wobei ihm zusätzlich Wärme entzogen wird, so als ob die Umgebungstemperatur niedriger wäre. Im Prinzip ist es daher sogar möglich, bei Temperaturen über dem Gefrier-

punkt Schnee zu erzeugen, wenn nur die Luft trocken genug ist.

Für die Ansprüche von Skiläufern und Snowboardern reicht es allerdings nicht aus, einfach nur Schnee zu erzeugen – er muss auch gut und gleichmäßig sein. Dafür werden große Anlagen heute von einem zentralen Computer gesteuert, der mittels Wetterstationen entlang der Piste die lokalen meteorologischen Bedingungen ermittelt und die Parameter aller Kanonen so einstellt, dass auch bei großen Höhen- und Temperaturunterschieden an kilometerlangen Strecken eine gleichmäßige Schneedecke entstehen kann. Auch bei bester Kontrolle stehen aber oft noch die Interessen der Pistenbenutzer, die meist einen möglichst trockenen und daher gut befahrbaren Schnee wünschen, und den Interessen der Pistenbetreiber gegenüber, für die ein nasserer Schnee günstiger ist, weil er das Terrain besser bedecken kann und auch bei starker Beanspruchung länger hält.

Die Schattenseite der Propellerkanone ist ihr enormer Verbrauch an Wasser und Energie. Bei günstigen Bedingungen (z. B. –12 °C, 60 % relative Luftfeuchte) kann eine ausreichend große Propellerkanone etwa die Fläche eines Fuß-



Wasserdüsen einer Propellerschneekanone

ballfeldes (70×105 m) innerhalb von 12 Stunden mit 35 cm Schnee bedecken. Dabei verbraucht sie allein aber ca. 600 kWh elektrischer Energie und insgesamt mehr als eine Million Liter Wasser. Oft werden daher Rücklaufsysteme verwendet, die das Schmelzwasser auffangen und wieder verwerten; und da die Systeme primär bei Nacht betrieben werden, können mit den Stromlieferanten besondere Konditionen ausgehandelt werden.

Die Propellerkanone ist in Europa das häufigste System, allerdings verbreitet sich inzwischen auch die Schnei-Lanze immer mehr. Um den

Tropfen auch ohne Turbine oder massiven Druckluft Einsatz die Zeit zum Gefrieren zu geben, hat die Lanze Wasserdüsen und Nukleatoren an der Spitze einer bis zu zehn Meter langen, meist fast senkrecht in der Luft stehenden Stange. Bei geeigneter Größe der Tropfen reicht dann allein die Fallzeit zum Gefrieren aus. Den niedrigeren



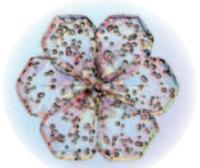
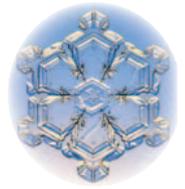
Schnei-Lanze in Aktion

Energieverbrauch und die einfache Bauweise erkaufte man sich jedoch mit geringeren Schneemengen und einer größeren Abhängigkeit von Wind und Wetter.

Schließlich gibt es noch die „brute-force“-Methode des Schneemachens, die Kryokanone, bei der Wasser und Druckluft zusätzlich mit kryogenen Mitteln wie flüssigem Stickstoff vermischt werden. Selbst bei Umgebungstemperaturen weit über dem Gefrierpunkt muss man sich hier nicht um Aspekte wie Luftfeuchtigkeit kümmern, aber allein die Kosten machen den flächendeckenden Einsatz unmöglich.

Darüber hinaus sind noch eine Reihe von Umweltschutzaspekten bei allen Arten von Schneekanonen zu berücksichtigen, etwa dass die künstlich verlängerte Skisaison die Vegetationszeit verkürzen kann, oder dass Leitungswasser einen höheren Mineraliengehalt als natürlicher Niederschlag hat und daher den Boden zusätzlich belasten kann. In manchen Teilen der Welt werden sogar Bakterien (*Pseudomonas syringae*) oder Proteine, die sich als Gefrierkeime besonders gut eignen, dem Schnee zugesetzt, um das Ausfrieren noch effektiver zu gestalten. Dies ist in Deutschland jedoch nicht erlaubt.

PATRICK VOSS-DE HAAN



Dr. Patrick Voss-de Haan,
voss_de@mail.uni-mainz.de