



## Garantiertes Schneesvergnügen

Technischer Schnee sorgt zuverlässig für gute Pistenverhältnisse, steht aber unter anderem wegen des hohen Energie- und Wasserbedarfs in der Kritik.

Kerstin Sonnabend

In den Wintersportgebieten auf der ganzen Welt ist ihr Anblick vertraut: Schneekanonen garantieren beste Pisten- und Loipenqualität. Sie erzeugen technischen Schnee und ahmen dabei die Vorgänge nach, wenn Schneekristalle in der Natur entstehen. Der dazu notwendige Aufwand an Energie und Wasser sorgt dafür, dass vor allem Umweltschutzverbände den massenhaften Einsatz des Verfahrens kritisieren. In diesem Winter findet die Diskussion eine breitere Basis, weil allerten Energie gespart werden soll.

Natürlicher Schnee entsteht, wenn feuchte Luft unter den Taupunkt  $\tau$  abkühlt, an dem die relative Luftfeuchtigkeit genau 100 Prozent beträgt. Dann enthält die Luft mehr Feuchtigkeit, als sie temperaturabhängig halten kann, sodass diese zu feinsten Wassertropfchen kondensiert. Fehlen geeignete Kristallisationskeime, kann dieses Wasser bis zu einer Temperatur von  $-48\text{ }^{\circ}\text{C}$  flüssig bleiben. Liegen solche Keime etwa in Form von Staubpartikeln vor, lagern sich un-

terhalb von  $-12\text{ }^{\circ}\text{C}$  die unterkühlten Wassertropfchen an – ein Wert, der in der Troposphäre typischerweise in fünf Kilometern Höhe erreicht wird. Dann gefrieren die Tropfen zu Eiskristallen, die kleiner als 100 Nanometer sind. Die winzigen Kristalle wachsen durch weitere Wassermoleküle an, die sich nur unter einem Winkel von  $60^{\circ}$  oder  $120^{\circ}$  anlagern. Dadurch entstehen die typischen sechseckigen Formen: bei tiefen Temperaturen als Plättchen oder Säulen, bei höheren als fein verästelte Dendrite (**Abb. 1**).

Bei seinem Fall aus den Wolken durchläuft ein Schneekristall in der Regel unterschiedliche Temperaturschichten, sodass normalerweise Mischformen vorliegen. Da ein Kristall etwa  $10^{18}$  Wassermoleküle enthält, ist es extrem unwahrscheinlich, dass es bisher zwei exakt gleiche gab. Nur selten entstehen aber die häufig fotografierten symmetrischen und selbstähnlichen Strukturen; viel öfter treten asymmetrische Formen auf. Auf dem Weg zum Boden verkleben die

Kristalle zu Schneeflocken, die etwa 5 Millimeter groß und 4 Milligramm schwer sind. Natürlicher Schnee hat eine Dichte zwischen 10 und  $80\text{ kg/m}^3$ .

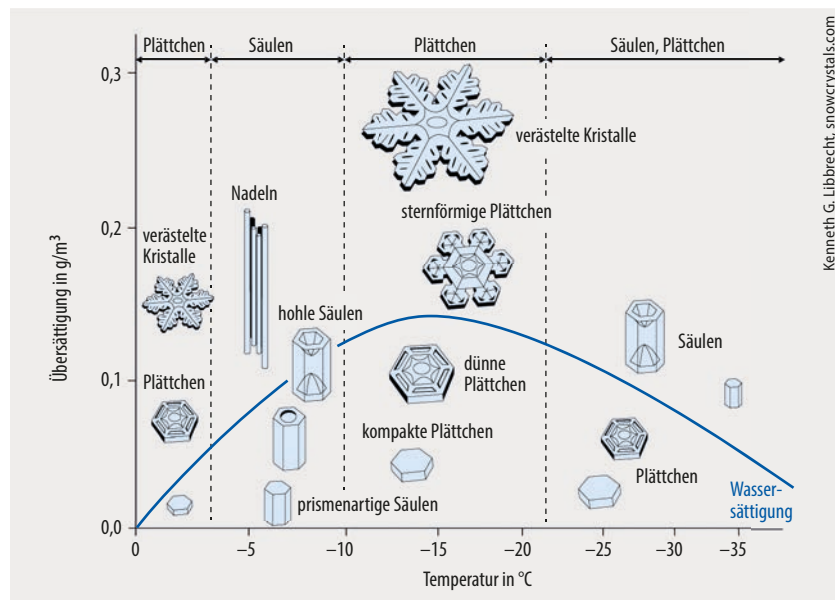
Damit ist er deutlich leichter als sein technisches Pendant, dessen Dichte mit 300 bis  $500\text{ kg/m}^3$  eine Größenordnung höher ist. Das liegt auch an der eher kugelförmigen Kristallstruktur, die eine dichtere Packung erlaubt. Schneeerzeuger versprühen feine Wassertropfen und Druckluft. Wenn sich letztere auf Normaldruck entspannt, lässt der Joule-Thomson-Effekt das Gemisch abkühlen. Dann gefrieren einzelne Wassertropfen zu Eiskristallen, an denen sich weitere Wassermoleküle anlagern. Die geringere Fallhöhe und der in Bodennähe höhere Luftdruck führen zu kleineren Kristallen als bei natürlichem Schnee.

Zu den gängigsten Schneeerzeugern gehörte lange Zeit die Druckluftkanone. Sie vermischt Wasser und Luft in einer Kammer und schleudert das Gemisch über eine Düse bei 5 bis 10 bar in die Umgebung. Die Expan-

sion der Luft entzieht dabei Wärme und lässt die Tropfen gefrieren. Die lauten Kompressoren verbrauchen viel Energie. Daher finden sich heute an den Pisten meist Propellerkanonen, die mit einem kleineren Kompressor arbeiten: Ein Kranz kleiner Düsen erzeugt zunächst Kristallisationskeime. Aus größeren Düsen kommen Wassertropfen hinzu; ein Propeller bläst alles auf eine Flugbahn von bis zu 50 Metern Länge, auf der ausreichend Zeit zum Ausfrieren besteht. Entsprechend ihrer Reichweite aufgestellt, sorgt ein ganzes Netz dieser Geräte bei modernen Beschneiungsanlagen für eine gleichmäßige Schneedecke. Ergänzend kommen Schneelanzen hinzu. Sie arbeiten ebenfalls mit einer Kombination verschiedener Düsen, die Wasser, Druckluft und ein Gemisch für Kristallisationskeime versprühen. Die Flugbahn ist deutlich kürzer als bei Propellerkanonen und macht ein gezieltes Beschneien möglich. Bei ihnen sorgen die Fallhöhe von mehr als zehn Metern und die langsame Sinkgeschwindigkeit dafür, dass dem Wasser Zeit zum Gefrieren bleibt. Weitere Verfahren, wie bei Eis- oder Kryokanonen, arbeiten weniger effizient und kommen nur bei Veranstaltungen oder für Werbezwecke zum Einsatz.

## Am besten kalt und trocken

Um technischen Schnee zu erzeugen, müssen Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit zueinander passen. Ein Maß dafür ist die Feuchtkugelmperatur  $t_F$ . Sie liegt immer oberhalb des Taupunkts  $\tau$ , aber unterhalb der Lufttemperatur  $t_L$ :  $\tau \leq t_F \leq t_L$ . Die Feuchtkugelmperatur beschreibt für ein Luft-Wasser-Gemisch, auf welche Temperatur es durch Verdunstungskälte abkühlen kann: Sie muss unterhalb von 0 °C liegen, damit Wasser gefriert, und lässt sich mit Näherungsformeln berechnen, die an Messwerte angepasst sind.<sup>1)</sup> Moderne Schneerzeuger arbeiten in der Regel bei Feuchtkugelmperaturen von  $t_F \leq -2,5$  °C. Gemäß einer Faustregel liegt diese bei sehr geringer Luftfeuchtigkeit schon bei Plusgraden vor; bei höherer Luftfeuchtigkeit sind dagegen Lufttemperaturen unterhalb von 0 °C nötig.



**Abb. 1** Abhängig von Luftfeuchtigkeit und Temperatur entstehen unterschiedlich geformte Schneekristalle, die der japanische Physiker Nakaya Ukichirō als Erster klassifizierte.

Wie viel Energie es braucht, um einen Kubikmeter Schnee technisch zu erzeugen, hängt stark von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab: Grundsätzlich steigt der Wirkungsgrad einer Beschneiungsanlage mit sinkender Temperatur. Darum kann es sinnvoll sein, den Schnee bei trockener Kälte auf Vorrat zu erzeugen und geschützt zu lagern – insbesondere für den verlässlichen Saisonstart in den Ski-gebieten oder für besondere Sportereignisse. So warteten seit dem letzten Frühjahr rund 34 000 Kubikmeter technischer Schnee in verschiedenen Depots im Thüringer Wald auf ihren Einsatz bei der diesjährigen Biathlon-Weltmeisterschaft in Oberhof.

Bezüglich der Umweltverträglichkeit solcher Vorgehensweisen sind unterschiedliche Aspekte zu beachten. Am offensichtlichsten sind wohl der hohe Energie- und Wasserbedarf von Beschneiungsanlagen. In der Energieversorgung halten in den letzten Jahren immer häufiger regenerative, lokale Lösungen Einzug: So lässt sich im Sommer ein natürlich gespeister Wasserspeicher auch als Reservoir für ein kleines Wasserkraftwerk nutzen. Wenn dieses so viel Elektrizität erzeugt, wie im Winter für die Beschneiung nötig ist, gleicht sich im Jahresmittel die Energiebilanz aus. Die Wasserspeicher stellen jedoch einen massiven Eingriff in das empfindliche Gleichgewicht des alpinen

Wasserhaushalts dar: In heißen und trockenen Sommern können talwärts liegende Bachläufe und Feuchtgebiete austrocknen, wenn das Wasser in höheren Bergregionen verbleibt. Um die Speicher ausreichend zu füllen, ist es oft notwendig, natürliche Wasserläufe zu regulieren und zu verbauen.

Außerdem beeinflusst der verdichtete Schnee auf den Pisten Vegetation und Boden. Wenn die Temperaturen im Frühjahr steigen und die Schneedecke immer feuchter wird, sorgt die Präparierung für mehr als 600 kg/m³ Dichte. In Bodennähe führt eine nahezu luftundurchlässige Eisschicht zu verzögertem Abschmelzen: Der Sauerstoffaustausch zwischen Boden und Luft ist behindert und empfindliche Pflanzen sterben ab. Da die spätere Schneeschmelze bei höheren Temperaturen schneller abläuft und durch den technischen Schnee auf einem Quadratmeter Skipiste bis zu 500 Liter mehr Wasser lagern, kann es zu mehr Erosion auf den Hängen kommen.

Ohnehin bleibt abzuwarten, wie lange die milder werdenden Winter eine technische Beschneiung noch zulassen – physikalisch und ökonomisch. Um die Eingriffe in die Natur zu reduzieren, scheint es angebracht, nur solche Gebiete zu beschneien, die sich auch unter natürlichen Bedingungen zum Skifahren eignen.

1) R. Stull, J. Appl. Meteor. Climatol. **50**, 2267 (2011)