

Wie Schneekristalle entstehen

Subtile molekulare Vorgänge bestimmen das Wachstum der erstaunlich vielfältigen und kunstvollen Eiskristalle. Ihre Erklärung fordert die Forscher noch heute heraus.

Von Kenneth G. Libbrecht

Ob Eiswürfelbehälter im Kühlschrank oder gefrorene Seen – Eis nimmt stets die Form seines Gefäßes an. Ganz anders bei Schneeflocken: Hier führt der simple Vorgang des Gefrierens von Wasser stattdessen zu zahllosen komplexen Formen. Deren Vielfalt verblüfft zu Recht – gemäß der alten Redewendung, dass sich keine zwei Schneeflocken exakt gleichen. Im Schneefall eröffnet sich für Naturfreunde eine wundersame Welt, die der amerikanische Autor Henry David Thoreau (1817–1862) so beschrieb: »Wie angefüllt mit kreativem Genie ist die Luft, die das erzeugt! Ich würde es kaum mehr bewundern, wenn echte Sterne fielen und an meinem Mantel hängen blieben.«

Wasser ist ein so präsender Stoff, dass man erwarten würde, es wäre bereits alles über Thoreaus »kreatives Genie« bekannt – wie nämlich Schneeflocken ihre komplexen Strukturen entwickeln. Tatsächlich aber ist ein großer Teil des Wachstums dieser winzigen Meisterwerke auch heute noch ziemlich schwierig zu erklären, selbst auf einer rein qualitativen Ebene. Beim Wachstum der Schneeflocken handelt es sich um ein hochgradig nichtlineares Nichtgleichgewichtsphänomen, bei dem kleinste Prozesse im Nanobereich die Entwicklung komplexer Muster

auf allen Skalen beeinflussen können. Die Analyse von Schneeflocken vereint daher Moleküldynamik, Oberflächenphysik, Wachstumsinstabilitäten, Strukturbildung und Statistische Mechanik. Die Forscher beginnen denn gerade erst zu verstehen, wie die Gebilde ihre typischen Formen erhalten.

Schneekristalle entstehen immer dann, wenn Wasserdampf in der Atmosphäre direkt zu Eis kondensiert, also die flüssige Phase auslässt. Der Begriff »Schneeflocke« entstammt der Meteorologie, der diverse Arten des winterlichen Niederschlags bezeichnet – von einzelnen Schneekristallen bis hin zu Anhäufungen vieler Kristalle, die miteinander kollidieren, aneinander haften und als locker gepackter Flockenball zur Erde rieseln.

Schneekristalle bilden sich gewöhnlich dann, wenn warme, feuchte Luftmassen zusammenstoßen und dort eine Wetterfront entsteht. Schiebt sich die warme Luft dabei nach oben, kühlt sie ab. Unterhalb einer bestimmten Temperatur kann der Wasserdampf der Luft in zahllose Wassertröpfchen kondensieren. Jedes Tröpfchen benötigt dabei einen Kondensationskeim. Diesen liefern die Staubpartikel in der Luft. Die mikrometergroßen, kugelförmigen Tröpfchen streuen das Licht sehr effektiv, deshalb bilden sie sichtbare Wolken. Eine mittelgroße Wolkenbank speichert etwa eine Million Tonnen Wasser, alles in Form winziger, schwebender Tröpfchen.



SOWEIT NICHT ANDERS ANGEZEIGT, ALLE FOTOS DES ARTIKELS: KENNETH LIBBRECHT UND WWW.SNOWCRYSTALS.COM

Faszinierende Vielfalt natürlicher Schneekristalle: eine kurze Säule mit fassettierten Flächen, die durch die Konkurrenz um Wasserdampf teilweise ausgehöhlt sind (a), ein hexagonales Plättchen (b), ein sternförmiges Plättchen (c), ein unterteiltes Plättchen (d), ein sternförmiger Dendrit (e), eine Hohlsäule (f), ein Nadelbündel (g), eine Hantel (h) und eine Rosette aus Pyramiden-Prismen mit Plättchen (i). Die kleinsten Prismen sind nur wenige zehntel Millimeter groß, sternförmige Dendriten erreichen dagegen bis zu zehn Millimeter Durchmesser.



Kühlt die so neu entstandene Wolke weiter ab, spielen die Staubteilchen noch eine andere Rolle – sie beschleunigen die Schneebildung. Sobald die Temperatur unter null Grad Celsius sinkt, gefrieren die Wassertröpfchen nämlich nicht sofort. Stattdessen bleiben sie flüssig, sie sind dann in einem so genannten unterkühlten Zustand. Reines Wasser lässt sich, bevor es gefriert, bis zu einer Temperatur von minus 40 Grad herunterkühlen. Staubteilchen stellen nun eine feste Oberfläche bereit, an welcher der Gefrierprozess schlagartig einsetzen kann. Tröpfchen mit eingeschlossenen Partikeln erstarren deshalb bereits bei rund minus sechs Grad. Da die Staubteilchen verschieden groß ausfallen, gefrieren nicht alle Tröpfchen bei derselben Temperatur. Es gibt also beim Abkühlen der Wolke einen Übergangsbereich, in dem die Tröpfchen allmählich fest werden.

Gefriert ein Tröpfchen, beginnt es sogleich zu wachsen, weil an seiner Oberfläche weiterhin Wasserdampf kondensiert. Schneekristalle bilden sich deshalb hauptsächlich aus Dampf und nicht aus flüssigem Wasser. Dieser geht direkt in die Gitterstruktur des Kristalls über. Tröpfchen in der Wolke, die nicht gefrieren, verdampfen langsam und liefern so zusätzlich Wasserdampf zur Bildung von Schneekristallen. Es findet also ein Netto-

transfer von Wassermolekülen aus flüssigen Tröpfchen über Wasserdampf in die Kristalle statt.

Das ist – in groben Zügen – der Weg, auf dem das flüssige Wasser der Wolken gefriert. Um ausreichend Dampf für einen einzigen großen Schneekristall zu liefern, müssen zuvor in einer Wolke rund eine Million winziger Tröpfchen verdampfen. Die Kristalle wachsen und werden dadurch schwerer; schließlich zerrt die Schwerkraft sie aus ihrer wolkgigen Kinderstube.

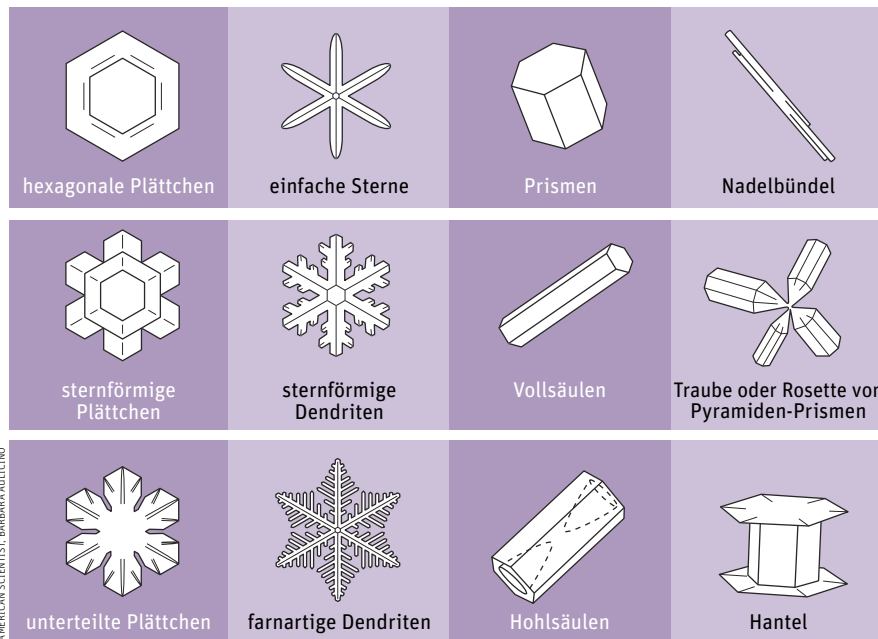
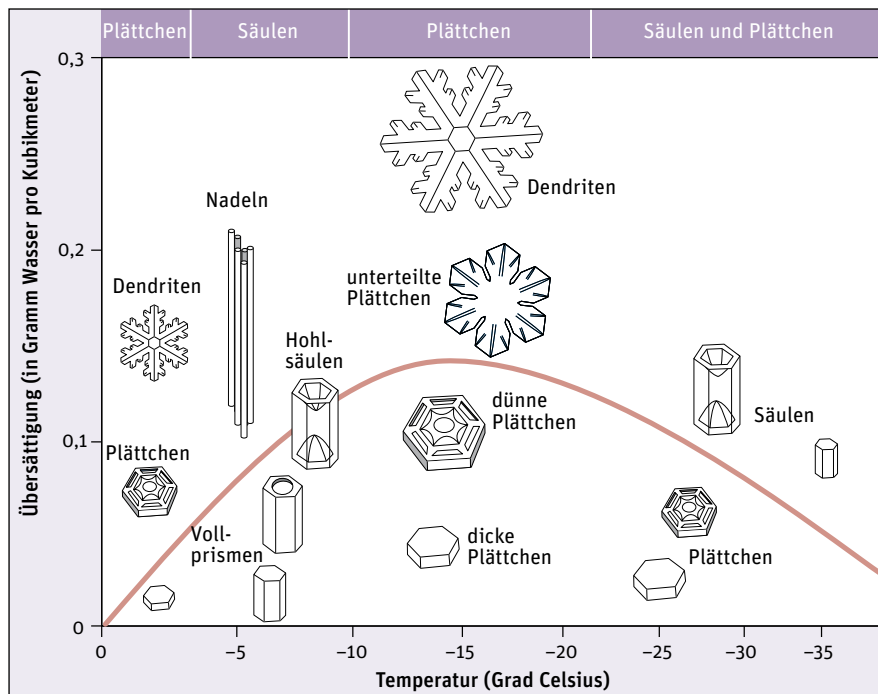
Hohlräume im Schnee

Die räumliche Anordnung der Atome im Wassermolekül führt dazu, dass Eis ein hexagonales Kristallgitter besitzt – diese Geometrie ist der Grund für die sechszählige Symmetrie aller Schneeflocken. Ihre Kristalle bilden zunächst kleine, hexagonale Plättchen, etwa so groß wie der Punkt am Ende dieses Satzes. Diese elementaren Gebilde können sich dann zu schlanken Säulen, dünnen Platten oder anderen, noch komplexeren Strukturen entwickeln (siehe die Fotos auf dieser Doppelseite).

Typischerweise werden diese beim Wachsen der Kristalle immer komplizierter. Säulenförmige Schneekristalle können kegelförmige Hohlräume an ihren Enden ausbilden – oder sie verwandeln sich in millimeterlange Eisnadeln. Kräftige Säulen

IM IRRGARTEN DER SCHNEEFLOCKEN

Die Struktur der Schneekristalle hängt empfindlich von Temperatur und Luftfeuchtigkeit ab, wie das in den 1930er Jahren von Ukichiro Nakaya entwickelte Diagramm (unten) zeigt. Übersättigung bezeichnet hier den Überschuss an Wasserdampf in der Luft, wenn die Luftfeuchtigkeit 100 Prozent übersteigt. Zwischen null und minus drei Grad entstehen kleine Plättchen und Sterne. Zwischen minus drei und minus zehn Grad bilden die Kristalle dünne Nadeln und lange Säulen. Zwischen minus zehn und minus 22 Grad wachsen im Bereich niedriger Übersättigung Plättchen, während sich sonst größere verzweigte Strukturen entwickeln. Besonders große und fotogene Formen tauchen um minus 15 Grad auf. Bei noch niedrigeren Temperaturen bilden sich wieder kleine Plättchen oder Säulen. Die Kurve in dem Diagramm zeigt Feuchtigkeitswerte dichter Wolken. Die Grafiken ganz unten zeigen eine Auswahl weiterer Unterformen der Kristalltypen, die darüber im Nakaya-Diagramm zu sehen sind.



AMERICAN SCIENTIST, BARBARA AULLICINO

len verbinden sich oft zu ganzen Haufen, so genannten Trauben oder Rosetten. Im Zentralbereich einer solchen Ansammlung konkurrieren die Säulen um den Wasserdampf, dadurch ist das Wachstum dort eingeschränkt. So entstehen die in der Mitte einer Rosette spitz zulaufenden Formen.

Aus kleinen Plättchen können sechs Haupt-äste herausprießen, sodass ein sternförmiger Kristall entsteht. Solche Gebilde werden zwei bis drei Millimeter groß, etwa so groß wie dieses »O«. Die Arme der verzweigten sternförmigen Plättchen entwickeln an ihrer Oberfläche oftmals Riffelungen oder andere Muster. Aus den sechs Zweigen eines Schneekristallsterns können zudem zahlreiche Seitenäste hervorragen, sodass eine farnartige, dendritische Struktur entsteht, die sich bis auf zehn Millimeter Länge auswachsen kann. Die Winkel zwischen den Seitenästen betragen stets ein Vielfaches von 60 Grad, benachbarte Seitenäste wachsen parallel zueinander.

Manchmal beginnt ein Schneekristall als Säule – und wechselt während des Wachstums in die Form einer Platte. So entstehen »Hanteln«, zwei flache Kristalle, die durch eine Säule verbunden sind – wie zwei Räder auf einer Achse. Beispiele reiner Symmetrie sind bei Schneeflocken allerdings eher die Ausnahme, denn es gibt allzu viele Mechanismen, die das perfekte Wachstum eines Schneekristalls stören können.

Keplers Neujahrsgabe

Ein junger Schneekristall beginnt zunächst als ein wenige Mikrometer großes Objekt. Solange das Tröpfchen nur einen Eiskristall ohne jeden Defekt bildet, spielt seine ursprüngliche Form für seine spätere, endgültige Struktur keinerlei Rolle. Die detaillierte Morphologie eines individuellen Schneekristalls entwickelt sich erst im Lauf der Zeit, während der Wasserdampf schichtweise an seiner Oberfläche kondensiert. Um die große Vielfalt der Formen von Schneekristallen zu verstehen, müssen wir also die Dynamik ihres Wachstums analysieren.

Johannes Kepler (1571–1630) war der Erste, der Schneekristalle wissenschaftlich untersuchte. 1611 schrieb der Astronom einen kleinen Aufsatz mit dem Titel »Neujahrsgabe oder vom sechseckigen Schnee«. Darin versuchte der Entdecker der Planetengesetze die blütenförmigen Strukturen zu erklären:

Man könne »einwenden, dass die einzelnen Pflanzen je ein besonderes seelisches Vermögen hätten, da sie ja auch von den anderen abgesondert als einzelne Pflanzen existieren. Daher sei es auch nicht verwunderlich, dass jede einzelne Pflanze eine besondere Gestalt be-

sitze. Jedoch beim Schnee für jedes Sternchen eine besondere Seele anzunehmen, das sei lächerlich. Deswegen können die Figuren des Schnees auch nicht in gleicher Weise aus den Wirkungen einer Seele wie bei den Pflanzen abgeleitet werden.

Ersetzt man hier »Seele« etwa durch »komplexe Biochemie lebender Organismen«, dann erweisen sich seine Gedanken als grundsätzlich korrekt. Es gibt keine genetische Blaupause, nach der sich Schneekristalle entwickeln könnten. Ihr Wachstum wird vielmehr durch relativ einfache physikalische Gesetze bestimmt – Gesetze, die viel einfacher sind als die Chemie lebender Organismen –, und trotzdem tauchen dabei ganz spontan komplexe Formen auf. Kepler erkannte, dass die Entstehung komplexer Muster und Strukturen ein interessantes wissenschaftliches Problem darstellt – ein Problem, mit dem sich Forscher noch heute beschäftigen.

Die Erfindung der Röntgenbeugung in den 1920er Jahren eröffnete erstmals einen Blick in kristalline Strukturen und begründete damit die Kristallografie. Rasch zeigte sich die sechszählige Gittersymmetrie der Eiskristalle. Diese Geometrie erklärte zwar die hexagonale Struktur der Schneekristalle, aber noch nicht ihre komplexe Morphologie.

In den 1930er Jahren setzte Ukichiro Nakaya von der Universität Hokkaido in Japan erstmals die wissenschaftlichen Methoden des

20. Jahrhunderts für das Problem ein. Nach seinen bemerkenswerten Untersuchungen befand er, dass nur Laborexperimente klären könnten, unter welchen Bedingungen die verschiedenen Kristalltypen entstehen.

Der Physiker ließ erstmals einzelne Schneekristalle in Kammern wachsen. Bald erkannte er, dass die Morphologie der Flocken hauptsächlich von Temperatur und Feuchtigkeit der Luft abhängen. Unter dem Gefrierpunkt, bei etwa minus zwei Grad Celsius, tauchen dünne, plättchenförmige Kristalle auf. Bei minus fünf Grad entstehen bevorzugt schlanke Nadeln. Bei minus 15 Grad bilden sich die größten und dünnsten plättchenförmigen Kristalle, unter minus 25 Grad wachsen die Kristalle hauptsächlich zu kurzen Säulen heran.

Je feuchter, desto komplexer

Bei allen Temperaturen, so fand Ukichiro Nakaya heraus, entstehen bei geringer Luftfeuchtigkeit einfache prismenförmige Kristalle, die nur langsam wachsen. Eine höhere Luftfeuchtigkeit dagegen beschleunigt das Wachstum und fördert komplexere Strukturen. Spätere Arbeiten zeigten, dass kleinere Kristalle zumeist einfacher, größere Kristalle dagegen komplexer sind. Der Japaner präsentierte alle seine Daten in einem heute nach ihm benannten Diagramm, in dem die Formen der Kristalle als Funktion von Temperatur und Luftfeuchtigkeit dargestellt sind, das Nakaya-

In Kürze

- ▶ Keine Schneeflocke gleicht einer anderen. Gleichwohl unterscheiden Forscher **rund 80 Grundtypen**. Ihr Interesse gilt heute vor allem der Musterbildung in einer so genannten Nichtgleichgewichtssituation.
- ▶ Obwohl die **bizarre Temperaturabhängigkeit** als Ursache für die zahllosen Morphologien schon vor acht Jahrzehnten entdeckt wurde, entziehen sich Eiskristalle noch immer einer vollständigen Erklärung.
- ▶ Doch **mit Hilfe raffinierter Präzisionsexperimente und Computersimulationen** nähern sich die Forscher dem Geheimnis eines Phänomens, das für die meisten einfach nur reine Schönheit darstellt.

HISTORISCHE AUFNAHMEN UND ZEICHNUNGEN



1665 benutzte **Robert Hooke** eines der ersten, noch sehr schwachen Mikroskope, um die Formen von Schneeflocken zu skizzieren (unten). Wilson A. Bentley, ein Farmer aus Vermont, war der Erste, der Schneeflocken am Mikroskop fotografierte. Seine Sammlung aus den 1920er Jahren enthält über 5000 meisterhafte Bilder (ein Beispiel oben links). In den 1930er Jahren verbesserte Nakaya die Aufnahmetechnik. Er war außerdem der Erste, der synthetische Schneeflocken im Labor erzeugte (oben rechts). Nakaya benutzte Kaninchenhaare, um die Kristalle zu verankern.

FOTO OBEN LINKS: WOOD; FOTO OBEN RECHTS AUS: UKICHIRO NAKAYA, SNOW CRYSTALS - NATURAL AND ARTIFICIAL, HARVARD UNIVERSITY PRESS; ZEICHNUNGEN UNTEREN AUS: ROBERT HOOKE, MICROGRAPHIA, 1665; ILLUSTRATION LIBRARY

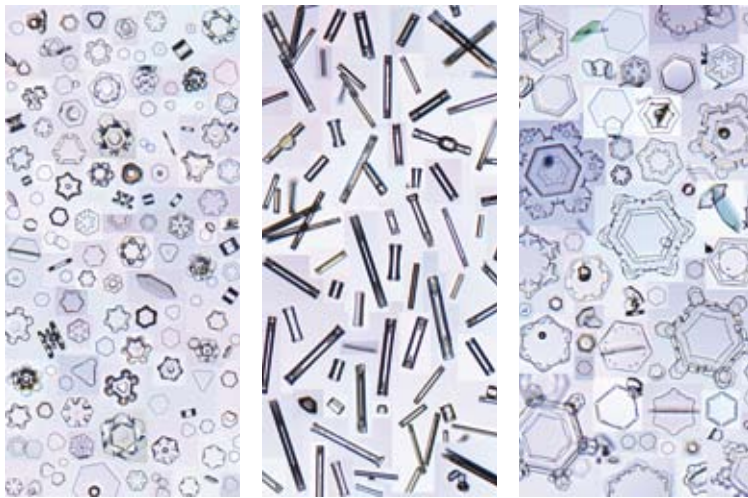
Diagramm (siehe Grafik S. 38). Heute, 75 Jahre später, können wir immer noch nicht alle Phänomene erklären, die dieses einfache Diagramm zeigt. Besonders die seltsame Temperaturabhängigkeit der Kristallmorphologie, die im Verlauf von wenigen Grad geradezu ein oszillatorisches Verhalten zeigt, stellt immer noch ein weitgehend ungelöstes Rätsel dar. Mit dem Nakaya-Diagramm lassen sich je-

doch zwei markante Merkmale der Schneekristalle mühelos erklären: ihre Vielfalt einerseits und das exakt gleiche Aussehen der sechs Zweige sternförmiger Flocken andererseits. Die Erklärung basiert auf Nakayas Beobachtung, dass das Wachstum der Eiskristalle bemerkenswert stark von Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängt.

Während eine junge Schneeflocke in einer Wolke herumwirbelt, ist sie veränderlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Dabei variiert auch ständig die Art ihres Wachstums: Der Kristall wächst entweder plättchen- oder säulenförmig, fassettiert oder verzweigt. Da dieser Prozess so empfindlich von Temperatur und Luftfeuchtigkeit abhängt, reichen schon geringe Veränderungen innerhalb der Wolke, um den Wachstumsvorgang umzuwerfen. So erhält der Kristall während seines Flugs durch die Wolke schließlich seine komplexe, vielgestaltige Struktur.

KÜNSTLICHE KRISTALLE AUS DEM LABOR

Was Schneekristallen bei verschiedenen Temperaturen passiert, lässt sich im Labor nachvollziehen. Die hier gezeigten kleinen Kristalle entstanden alle im freien Fall in einer Kammer mit einer mittleren Übersättigung, aber unterschiedlichen Temperaturen. Links: Kristalle, die bei minus zwei Grad Celsius entstanden, in der Mitte bei minus fünf Grad, rechts bei minus 15 Grad.



Chaos in der Schneewolke

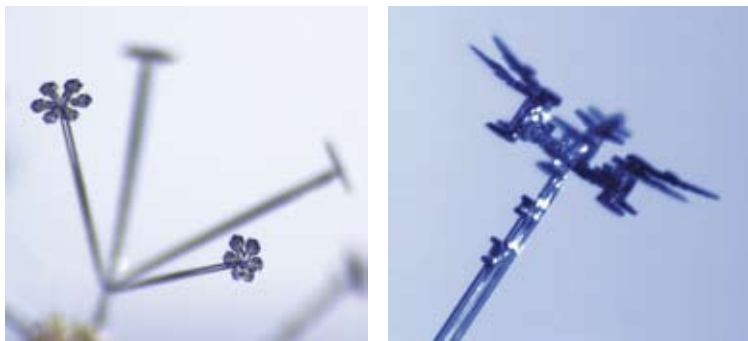
Außerdem ist der Weg, den ein Schneekristall in der Wolke zurücklegt, im Wesentlichen ein Zufallsprodukt turbulenter Luftströmungen. Deshalb durchlaufen zwei Schneeflocken in einer Wolke auch kaum jemals genau die gleiche Bahn. Damit geht die Wahrscheinlichkeit gegen null, dass zwei völlig identische Schneeflocken entstehen. Die Natur hat sich also geradezu verschworen, die erstaunliche Vielfalt der Schneekristalle hervorzubringen. Während jede Flocke ihrem eigenen, individuellen Weg folgt, reisen die sechs Arme eines einzelnen sternförmigen Schneekristalls natürlich stets gemeinsam. Sie sind also alle ständig den gleichen Veränderungen ausgesetzt. Deshalb wachsen diese Zweige synchron.

Es waren vor allem die Arbeiten zahlreicher Forscher in den Bereichen Kristallografie und Metallurgie, die das Verständnis der Schneekristalle weiter verbesserten. Eine wichtige Rolle spielte dabei auch die frühe Halbleiterindustrie: Plötzlich war es wirtschaftlich interessant, große Kristalle zu züchten – und dafür war ein besseres Verständnis des Kristallwachstums nötig.

Fast jeder Kristall entwickelt ebene Grenzflächen, auch Schneeflocken tun das. Gefriert ein Wolkentröpfchen, so entwickelt der Kristall solche Fassetten, weil einige seiner Flächen schneller Material ansammeln als andere. Kondensierende Moleküle werden besonders von abgerundeten Flächen angezogen, die auf atomarer Skala rau sind, weil solche Bereiche mehr molekulare Bindungen anbieten. Molekular ebene Regionen – also fassettierte Flächen – haben dagegen weniger freie chemi-

NADELZUCHT MIT ELEKTRISCHEN FELDERN

Im Labor gezogene Schneeflocken: Einmal wachsen sie an den Spitzen dünner Eisnadeln, die ihrerseits von elektrisch geladenen Drähten sprießen (links). Das starke elektrische Feld zieht Wassermoleküle aus der Luft an und beschleunigt so das Nadelwachstum. Wird dem Draht die elektrische Ladung entzogen, wächst der Kristall wieder normal. Im Wechselspiel von Temperatur und Feuchtigkeit lassen sich damit Designer-Schneeflocken kreieren (rechts). So wachsen an den Spitzen eines Dendriten etwa Hohlsäulen, dann Plättchen am Ende dieser Säulen – fertig ist der Kandelaber.



sche Bindungen und ziehen deshalb weniger Kondensat auf sich.

Ist der Kristall eine Weile gewachsen, bleiben nur die langsam wachsenden Seitenflächen übrig. Das Gebilde wird also fassettiert, unabhängig von seiner ursprünglichen Form. Die molekularen Bindungen an das Kristallgitter bestimmen darüber, welche Flächen langsam wachsen, und damit auch, welche Gitterebenen zu Fassetten werden. Beim Prozess der Fassettierung wird also die Geometrie des Wassermoleküls auf die Geometrie eines großen Kristalls übertragen.

Die Kristalle unterschiedlicher Mineralien unterscheiden sich auch in ihren Seitenflächen – abhängig von den Details ihrer Molekülgitter. Wenn die Fassettierung das Wachstum des Schneekristalls dominiert, entstehen Gebilde mit sechs Seiten- und zwei hexagonalen Grundflächen. Das ist die Grundform kleiner und langsam wachsender Schneekristalle. Überbleibsel dieser Form lassen sich oft in den Zentren größerer, komplexer Schneekristalle erkennen und verraten so deren einfache Ausgangsgeometrie. Unter bestimmten Umständen binden sich Wassermoleküle leichter an die Seitenflächen als an die Grundflächen der Prismen. Auf diese Weise entstehen dünne Eisplättchen. Unter anderen Bedingungen lagern sich Moleküle leichter an die Grundflächen an, wobei Säulen entstehen. In beiden Fällen spielt die Fassettierung eine wichtige Rolle bei der Entstehung unterschiedlicher Formen und Muster.

Aber dieser Prozess kann nicht alles erklären. Denn sonst wären alle Schneekristalle geformt wie einfache hexagonale Prismen – und das ist weit entfernt von der Wirklich-

keit. Wenn der Kristall groß wird – typischerweise etwa einen halben Millimeter – oder wenn er schnell wächst, tritt ein weiteres Phänomen hinzu. Dann nämlich entspringen dem Kristall Zweige. Diesen Effekt bewirkt die so genannte Mullins-Sekerka-Instabilität, fachlich auch Verzweigungsinstabilität genannt. Damit lässt sich im Großen und Ganzen erklären, wie aus nichts weiter als Wasserdampf spontan die blütenartigen Schneekristalle entstehen.

Spontane Entstehung von Zweigen und Seitenästen

Bei ihrem Wachstum verbrauchen sie den Wasserdampf ihrer unmittelbaren Umgebung. Weiter entfernte Moleküle benötigen etwas länger, bis sie die Kristalloberfläche erreichen. Der Prozess ist deshalb, wie Physiker sagen, »diffusionsbegrenzt«, die verschiedenen Regionen eines Kristalls konkurrieren untereinander um die verfügbaren Ressourcen. Wenn ein Punkt auf einem Kristall – beispielsweise eine der Spitzen eines hexagonalen Plättchens – weiter in die Luft hinausragt als seine Umgebung, dann sammeln sich die Wassermoleküle bevorzugt an diesem Punkt an, einfach weil er schneller zu erreichen ist. Die Spitze wird also etwas schneller wachsen als ihre Umgebung und dadurch noch länger werden. Im Ergebnis ergibt sich eine positive Rückkopplung, sodass aus den sechs Ecken eines hexagonalen Schneekristalls lange Zweige herauswachsen. Auch an zufälligen Verdickungen oder an fassettierten Spitzen der Hauptäste können sich weitere Seitenäste bilden.

Solche Instabilitäten sind der Hauptgrund für die spontane Entstehung von Mustern –

WENN FLOCKEN ZU SCHNEE WERDEN

Entstehung: Sobald mehrere Eiskristalle zusammenkleben, bilden sich wattebauschartige **Schneeflocken**.

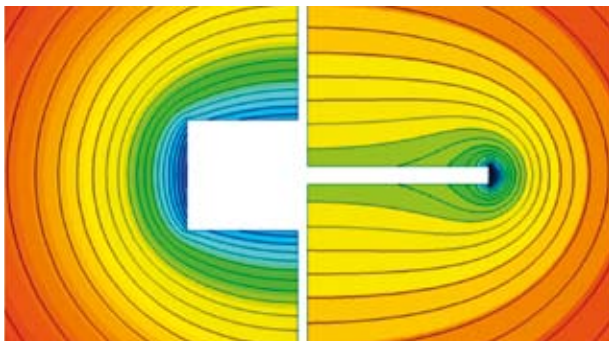
Gewicht: Natürliche Schneeflocken werden im Mittel fünf Millimeter groß und 0,004 Gramm schwer.

Schneefall: Schnee fällt mit 4 km/h wesentlich langsamer als etwa Regen mit 20 km/h oder gar Hagel.

Schneesmelze: Schnee kann tauen (nur flüssig werden), schmelzen (flüssig und gasförmig werden) oder sublimieren (nur gasförmig werden). Bei 50 Prozent relativer Luftfeuchte sublimiert Schnee unterhalb von plus 3,5 Grad, schmilzt zwischen 3,5 und zehn Grad und taut oberhalb zehn Grad.

COMPUTERSIMULATION UND EXPERIMENT

Flocken im Rechner: Hier wurde simuliert, wie Wasserdampf schichtweise auf dicken (links) und dünnen (Mitte) Schneekristallplättchen kondensiert. Die Farben entsprechen der Wasserdampfmenge: blau wenig, rot viel Dampf. An den Kopfenden dünner, schnell wachsender Plättchen entstehen dünnere



Schichten, Beleg für die so genannte Messerschneiden-Instabilität. Dieser Effekt beschleunigt das Wachstum dünner Plättchen und erklärt, warum Hanteln entstehen, bei denen ein Kristall schlagartig von säulenförmigem zu plättchenförmigem Wachstum umschwenkt (rechts).



und die Natur ist letztlich eine Anhäufung von übereinandergeschichteten instabilen Systemen. Die Sonne erhitzt die Luft am Erdboden, warme Luft steigt auf – und diese Konvektionsinstabilität erzeugt Winde, Wolken und Wetter. Der Wind wiederum bläst über die Meere und destabilisiert deren Oberfläche – Wellen peitschen übers Wasser und treiben Feuchtigkeit in die Atmosphäre.

Flächenbildung und Verzweigung sind die zwei wichtigsten Vorgänge beim Flockenwachstum, aber sie wirken in unterschiedliche Richtungen. Fassettierung stabilisiert, da sie ebene Flächen und einfache Formen ausbildet. Damit allein wären alle Schneekristalle hexagonale Prismen. Im Gegensatz dazu destabilisiert die Verzweigung, sie transformiert einfache in komplexe Formen. Verzweigung allein würde Kristalle erzeugen, die zwar viel Struktur, aber keinerlei Symmetrie besäßen – sie würden in etwa aussehen wie winziges Dornengestrüpp. Es ist das permanente Wechselspiel beider Prozesse, das die Vielfalt von Formen und Muster der Schneekristalle erzeugt.

Erst modernste Technologien enthüllen das Geheimnis der Kristalle

Verzweigung und Fassettierung erklären zwar viele Eigenschaften der Flockenbildung. Aber die Prozesse erhellen noch nicht die konkreten Kristallformen im Nakaya-Diagramm. In den vergangenen Jahren habe ich Schneekristalle unter kontrollierten Bedingungen untersucht und vermessen. Einen solchen Ansatz hat zwar auch schon Nakaya verfolgt – doch ich kann heute auf die Technologien des 21. Jahrhunderts zurückgreifen: Laserinterferometrie, digitale Datenaufzeichnung, präzise Temperatursteuerung und anderes, von dem Nakaya nicht einmal zu träumen wagte.

Ich hatte erwartet, dass das Wachstum der Kristalle bei meinen Messungen stark von der Temperatur abhängen würde. Denn wenn bei nur wenigen Grad Unterschied einmal dünne Plättchen, einmal schlanke Säulen entstehen, dann sollten sich die Wachstumsraten der Seiten- und Grundflächen von Prismen deutlich unterscheiden und sich stark mit der Temperatur verändern. Doch meine Messungen wiesen auf etwas anderes hin. Es gab zwar Unterschiede zwischen einzelnen Flächen, aber sie waren bei Weitem nicht so groß wie erwartet. Und die Wachstumsraten änderten sich mit der Temperatur, jedoch ebenfalls viel weniger als gedacht – zu wenig, um all die Unterschiede im Nakaya-Diagramm zu erklären.

Die Situation wurde noch spannender, als ich begann, das diffusionsbegrenzte Wachstum von Kristallen, speziell von dünnen Plätt-

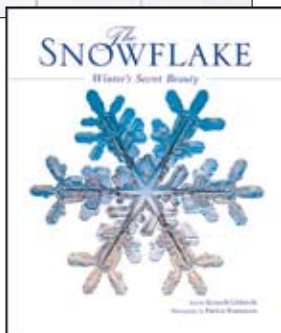
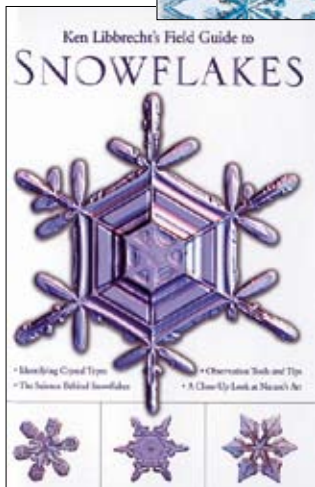
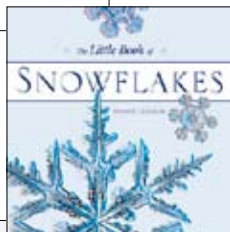
chen, im Computer zu simulieren. Die übliche Lehre der Verzweigungsinstabilität sagt voraus, dass die Feuchtigkeit an den Kanten der Plättchen am höchsten wird. Doch meine Modelle zeigten, dass das schnelle Wachstum an den Kanten der Plättchen zu einem Verbrauch des Wasserdampfs führt, sodass die Feuchtigkeit dort sogar niedriger ist als in anderen Regionen. Dieses Resultat widerspricht jeder Intuition. Die Verzweigungsinstabilität unterstützt das Wachstum dünner Plättchen nicht, sondern trägt eher zum Entstehen dickerer Formen bei.

Meine Messungen zu den Morphologien der Kristalle im Nakaya-Diagramm waren jedenfalls mit dem bisherigen Stand des Wissens nicht vereinbar. Die Modelle legten ja nahe, dass die Wachstumsraten im Verlauf von wenigen Grad um einen Faktor von 100 oder gar 1000 hochschnellen müssten. Doch das ist nach allem, was wir über die Dynamik dieser Prozesse wissen, wenig plausibel. Und tatsächlich zeigten die Daten, dass keine so großen Änderungen auftreten. Es musste also einen bislang unbekanntem Prozess geben, der zu den dramatischen Effekten in der Kristallform führte.

Die Lösung lag nach meiner Überzeugung in einer »strukturabhängigen Kinetik der Anlagerung« (*structure-dependent attachment kinetics*). Nach dieser Hypothese hängt die intrinsische Wachstumsrate einer fassettierten Oberfläche von ihrer Struktur ab. Insbesondere behauptete ich, dass eine extrem schmale Seitenfläche, wie sie an den Kanten sehr dünner Plättchen existiert, sehr viel schneller wächst als breitere Fassetten. Die Molekulardynamik, die zu diesem Verhalten führt, ist allerdings noch unklar. Möglicherweise sind Moleküle an den Kanten eines dünnen Plättchens weniger stark gebunden als an größeren Flächen, einfach weil sie weniger Nachbarmoleküle besitzen, an die sie sich binden können.

Das könnte dazu führen, dass solche Kanten intrinsisch rauer werden, da die Oberflächenmoleküle mehr Spielraum haben, sich hin und her zu bewegen. Eine rauere Oberfläche ist wiederum für kondensierende Moleküle attraktiver, was dann die Wachstumsrate erhöhen würde. Die Eisoberfläche besitzt ja eine höchst komplexe Molekularstruktur, die selbst für simple Fälle noch nicht vollständig verstanden wird. Deshalb kann derzeit niemand meine Hypothese beweisen oder widerlegen.

Eine strukturabhängige Kinetik der Anlagerung führt zu einem neuartigen Wachstumsverhalten, das ich »Messerschneiden-Instabilität« genannt habe. Wird die Kante eines



plättchenförmigen Kristalls, die zunächst eine bestimmte Breite hat, etwas dünner, dann beschleunigt die strukturabhängige Kinetik der Anlagerung das intrinsische Wachstum der Kante. Dies wiederum macht sie noch dünner, eben scharf wie eine Messerschneide, und lässt sie noch schneller anwachsen. Auch hier liegt wieder eine positive Rückkopplung vor, welche die Entstehung dünner, plättchenförmiger Strukturen verstärkt. Die Instabilität bleibt so lange bestehen, bis ein anderer Mechanismus eine weitere Schärfung der Kanten unterbindet.

Die Messerschneiden-Instabilität liefert nicht nur eine plausible Erklärung für die Beobachtungen meiner Experimente, sie erklärt auch viele Eigenschaften natürlicher Schneekristalle. So zeigten beispielsweise Nakayas Experimente, dass große sternförmige Kristalle – weitgehend unabhängig von Größe und Komplexität – zumeist rund 0,01 Millimeter dick sind (etwa ein Zehntel der Dicke eines Blatts Papier). Das ist genau das, was man bei so einer Instabilität erwartet, und es ist schwer auf andere Weise zu erklären.

Auch ein anderes Phänomen lässt sich damit verstehen. So zeigen hantelförmige Kristalle häufig einen scharfen Übergang zwischen Säulen- und Plättchenform. Ein scheinbar unvermittelt auftretender Wechsel zwischen beiden Wachstumstypen führt zu dünnen Plättchen an den Enden der Säule. Eigentlich würde man einen allmählichen Übergang erwarten, der zu dickeren Plättchen führt, aber das entspricht nicht den Beobachtungen.

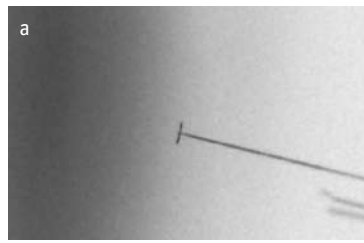
Auf des Messers Schneide

Der Grund dafür ist, dass Instabilitäten kleine Änderungen häufig verstärken. Ändert sich die lokale Umgebung nur ein wenig, was die Plättchenbildung favorisiert, dann lässt die Messerschneiden-Instabilität die Plättchen immer dünner werden. Die Instabilität verändert also das Wachstum abrupt, obwohl die äußeren Bedingungen nur langsam variieren.

Diese Verstärkung ist eine wichtige Eigenschaft der Messerschneiden-Instabilität, denn sie reduziert die temperaturabhängigen Wachstumsraten, die zur Erklärung des Nakaya-Diagramms nötig sind, ganz erheblich. Wir wissen zwar immer noch nicht, worum es sich bei diesen Temperatureffekten handelt, aber sie können zumindest nicht mehr ganz so dramatisch sein. Kleine temperaturabhängige Wachstumsvorgänge können so verstärkt werden, dass die beobachteten Kristallmorphologien entstehen.

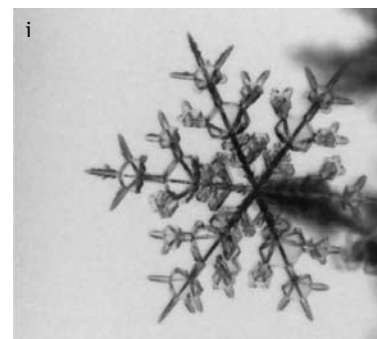
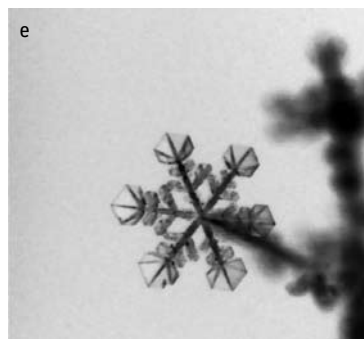
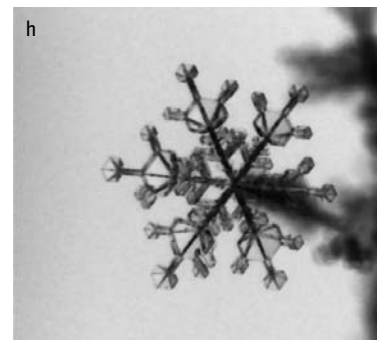
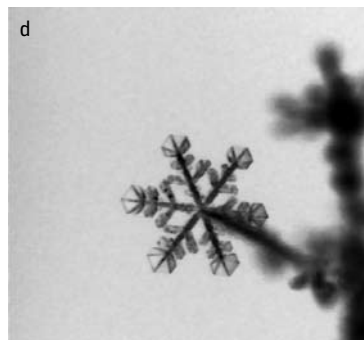
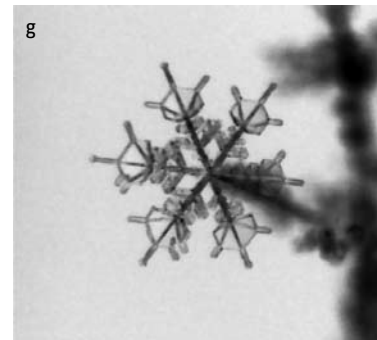
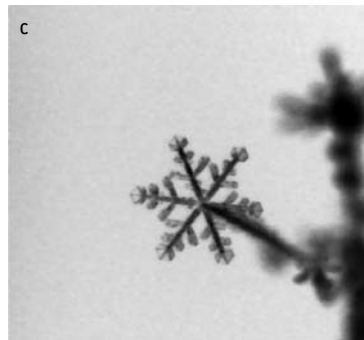
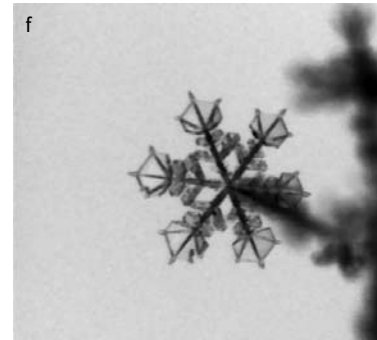
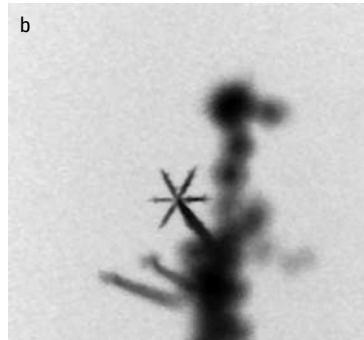
Offenbar wachsen Kristalle im Nanobereich auf Grund der Messerschneiden-Instabilität ganz anders als in größeren Dimensionen.

DESIGNER-SCHNEEKRYSTALLE

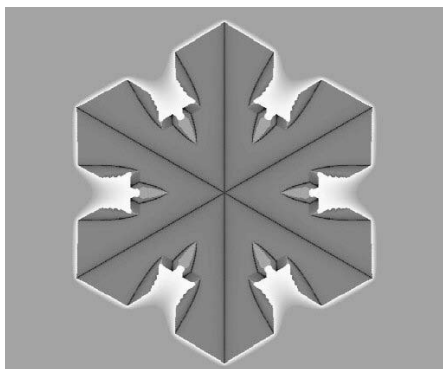


Eine Schneeflocke wächst im Labor:

Zunächst waren Temperatur und Luftfeuchtigkeit so eingestellt, dass sich der Kristall verzweigte. Dann wurden die Bedingungen geändert – nun bildeten sich Flächen und Plättchen aus.



WACHSEN EISKRISTALLE WIE ZELLULARAUTOMATEN?



COMPUTERSIMULATIONEN: DAVID GRIFFEATH UND JANKO GRAVNER, UNIVERSITY OF WISCONSIN

**Flocken als Zellularautomaten:**

Mit diesem Verfahren, bei dem dynamische Systeme räumlich und zeitlich diskret behandelt werden, gelang es Mathematikern, das Wachstum von Schneekristallen zu simulieren. Die simulierten Objekte folgen weitgehend denselben Regeln wie natürliche Schneekristalle.

Dies kann von großer Bedeutung für die Nanotechnologie sein, beispielsweise für die Selbstmontage komplexer Nanoteile aus einem Gemisch vorgegebener Materialien. Derzeit ist nicht klar, wie häufig diese Instabilität vorkommt oder welche anderen Überraschungen uns bei der Nano-Wachstumodynamik noch blühen.

Ich bin jedenfalls davon überzeugt, dass diese neu entdeckte Instabilität neben Fassetierung und Verzweigung der dritte wichtige Effekt für die Entwicklung von komplexen Schneekristallen ist. Sie scheint eine zentrale Rolle für die großräumige Struktur der meisten Flocken zu spielen und sie liefert uns einen wichtigen Verstärker, mit der sich die Morphologien im Nakaya-Diagramm erklären lassen. Ohne Messerschneiden-Instabilität wären Schneekristalle kleiner, dicker und die meisten ihrer schönen Eigenschaften würden ihnen fehlen.

Elektrisch modifiziertes Wachstum

Die Messerschneiden-Instabilität ist zwar eine bestechende Idee, aber bislang nur eine Hypothese. Weitere Experimente und Modelle sind nötig, um genau zu verstehen, wie Kristalle wachsen. So müssen wir mehr über Eisoberflächen wissen, damit die Molekulardynamik der Anlagerung erklärt werden kann. Auf molekularer Ebene zeigt Eis temperaturabhängige Erscheinungen wie Oberflächenschmelzen, Aufrauung und andere Phänomene. Wir kennen zwar die Oberflächenphysik von Eis immer besser, aber die Theorie ist noch lange nicht komplett. Eis überrascht uns immer wieder; es auf molekularer Ebene zu verstehen bleibt eine Herausforderung.

Außerdem benötigen wir bessere Computermodelle des Kristallwachstums. Das diffusionsbeschränkte Gefrieren wird heute schon besser modelliert, doch bislang hat noch niemand ein akkurates Computermodell des dif-

fusionsbegrenzten Wachstums unter Berücksichtigung starker Fassetierung entwickelt. Einige viel versprechende Arbeiten auf diesem Gebiet aus jüngerer Zeit stammen von David Griffeath von der University of Wisconsin-Madison und Janko Gravner von der University of California in San Diego. Beide Mathematiker verwenden Modelle auf Basis zellulärer Automaten, um das diffusionsbegrenzte Wachstum zu simulieren.

Weiterhin ist es wichtig, das Kristallwachstum für weitere, ganz unterschiedliche äußere Bedingungen – Temperatur, Luftfeuchtigkeit oder Luftdruck – zu messen. So führt beispielsweise eine Verringerung des Luftdrucks dazu, dass Wassermoleküle rascher diffundieren, was wiederum die Verzweigung von wachsenden Kristallen verringert. Auch ist die Frage noch offen, wie Druckschwankungen sich auf die Messerschneiden-Instabilität auswirken.

Meine Forschungsgruppe entwickelt gegenwärtig Methoden, bei denen das Kristallwachstum elektrisch modifiziert wird, was zur Bildung extrem dünner Nadeln führt. Auf deren Spitzen können wir inzwischen plättchen- oder säulenförmige Kristalle wachsen lassen. Ohne störende Luftströmungen werden solche Kristalle größer als in der freien Natur; bislang haben wir Flocken von bis zu 25 Millimeter Größe produziert. Innerhalb gewisser Grenzen können wir sogar Designer-Schneeflocken mit Mustern erzeugen, die wir selbst entworfen haben (siehe Kasten S. 41). Andere Gruppen, insbesondere an der Staatsuniversität Washington und der Staatsuniversität von Pennsylvania, benutzen elektro-dynamische Levitation, um einzelne Schneekristalle unter unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wachsen zu lassen. So stehen wir heute unmittelbar vor der Beantwortung jener Fragen, die Kepler vor 400 Jahren aufgeworfen hat, als er erstmalig über die wundervollen Formen der Schneeflocken nachgedacht hat. <



Kenneth G. Libbrecht lehrt Physik am California Institute of Technology in Pasadena. Seine Forschungen decken einen weiten Bereich ab – von der Sonnenaktivität bis zu Gravitationswellen. Von ihm stammen auch mehrere Bücher zum Thema.

© American Scientist
www.americanscientist.org

Schneeflocken. Juwelen des Winters. Von K. G. Libbrecht. Sanssouci, München 2005

The art of the snowflake: a photographic album. Von K. G. Libbrecht. Motorbooks International, 2007

Ken Libbrecht's field guide to snowflakes. Von K. G. Libbrecht. Voyager Press, 2006

Bilder von Schneekristallen:
www.snowcrystals.com

Homepage des Autors:
www.its.caltech.edu/~atomic/

Weblinks zu diesem Thema finden Sie unter www.spektrum.de/artikel/936494.