

Untersuchungen über natürliche und künstliche Schneekristalle

Von U. Nakaya und Mitarbeitern

Auszug aus einem der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung
am 13. November 1942 vorgelegten Bericht¹⁾

Zum Geleit: Herr Nakaya von der Kaiserlich-Japanischen Hokkaido-Universität in Sapporo hat in den Jahren 1933 bis 1940 zusammen mit einem Stab von Mitarbeitern eine Reihe höchst bemerkenswerter Untersuchungen über natürlichen und künstlichen Schnee durchgeführt. Die ab 1934 im Journal of the Faculty of Science der Universität erschienenen, aber wenig verbreiteten Veröffentlichungen haben überall, wo sie bekannt wurden, größte Beachtung gefunden. Nach einem groß angelegten Plan, doch frei von jeder theoretischen Vereinengenommenheit wurden unzählige Beobachtungen und Versuchsreihen angestellt, um die mannigfachen Probleme, die mit dem Entstehen und dem Wachsen der Schneekristalle verknüpft sind, einer Lösung näherzubringen. So ist ein Werk entstanden, dessen Übertragung ins Deutsche nicht nur durch die schwere Zugänglichkeit der Originalveröffentlichungen angezeigt erscheint, sondern auch durch den Reiz, den die Darstellung der so besonders naturverbundenen Arbeitsweise der japanischen Gelehrten gewährt.

Für die Übertragung ins Deutsche konnten vorhandene Übersetzungen von Herrn M. Diem, Fräulein v. Wittich und Herrn K. Horn benutzt werden, die von Herrn E. Wall überarbeitet wurden.

Da von den 14 Arbeiten einige nur vorläufigen Charakter tragen und durch spätere überholt oder zusammengefaßt sind, wurden diejenigen Arbeiten für die vorliegende Wiedergabe ausgewählt, welche mehr von grundsätzlicher Bedeutung sind oder einen allgemeinen Überblick geben.

Herr Wall gibt im Nachfolgenden auch eine Gesamtübersicht aller und eine kurze Inhaltsangabe der nicht übersetzten Arbeiten.

Für die Erlaubnis zur Übersetzung ins Deutsche ist die Deutsche Akademie der Luftfahrtforschung Herrn Nakaya zu großem Dank verpflichtet.

Erich Regener.

¹⁾ Der volle Wortlaut der Arbeit ist abgedruckt in den Mitt. d. Dt. Akad. d. Luftfahrtforschg Bd 2 (1943) II. 3.

Gesamtübersicht

Unter dem Sammeltitel »Investigations on Snow« erschienen im Journal of the Faculty of Science, Hokkaido Imperial University, Serie II, Physik, bis Dezember 1940 folgende 14 Arbeiten von U. Nakaya und seinen Mitarbeitern:

Nr. 1. U. Nakaya und T. Izima: Snow crystals observed in 1933 at Sapporo and some relations with meteorological conditions. A. a. O. Vol. I, S. 149 (1934).

»Schneekristallbeobachtungen im Jahr 1933 in Sapporo sowie einige Beziehungen zu den meteorologischen Bedingungen.«

Nr. 2. U. Nakaya und H. Hasikura: Classification and explanation of snow crystals observed in the winter of 1933-34 at Mt. Tokati and at Sapporo. A. a. O. Vol. I, S. 163 (1934).

»Einteilung und Beschreibung der im Winter 1933-34 am Mt. Tokati und Sapporo beobachteten Schneekristalle.«

Nr. 3. U. Nakaya und T. Terada jr.: On the electrical nature of snow particles. A. a. O. Vol. I, S. 181 (1935).

»Über die elektrische Natur der Schneeteilchen.«

Nr. 4. U. Nakaya und T. Terada jr.: Simultaneous observations of the mass, falling velocity and form of individual snow crystals. A. a. O. Vol. I, S. 191 (1935).

»Gleichzeitige Beobachtungen der Masse, Fallgeschwindigkeit und Gestalt individueller Schneekristalle.« Ins Deutsche übertragen S. 57.

Nr. 5. U. Nakaya: On the correspondence of snow and rime crystals. A. a. O. Vol. I, S. 201 (1935).

»Über die Übereinstimmung von Schnee- und Reifkristallen.«

Nr. 6. U. Nakaya und I. Satō: On the artificial production of frost crystals, with reference to the mechanism of formation of snow crystals. A. a. O. Vol. I, S. 206 (1935).

»Über die künstliche Herstellung von Reifkristallen mit Bezug auf den Bildungsmechanismus der Schneekristalle.«

Nr. 7. U. Nakaya, Y. Sekido und M. Tada: Notes on irregular snow crystals and snow pellets. A. a. O. Vol. I, S. 215 (1936).

»Bemerkungen über unregelmäßige Schneekristalle und Schneekügelchen.« Ins Deutsche übertragen S. 37.

Nr. 8. U. Nakaya und Y. Sekido: General classification of snow crystals and their frequency of occurrence. A. a. O. Vol. I, S. 243 (1936).

»Allgemeine Klassifikation der Schneekristalle und die Häufigkeit ihres Vorkommens.« Ins Deutsche übertragen S. 9.

Nr. 9. U. Nakaya, D. Tada, Y. Sekido und T. Takano: The physics of skiing, the preliminary and general survey. A. a. O. Vol. I, S. 265 (1937).

»Physik des Schilaufrs. Vorläufige und allgemeine Übersicht.«

Nr. 10. U. Nakaya, I. Satô und Y. Sekido: Preliminary experiments on the artificial production of snow crystals. A. a. O. Vol. II, S. 1 (1938).

»Vorläufige Versuche zur künstlichen Herstellung von Schneekristallen.«

Nr. 11. U. Nakaya, Y. Toda und S. Maruyama: Further experiments on the artificial production of snow crystals. A. a. O. Vol. I, S. 13 (1938).

»Weitere Versuche zur künstlichen Herstellung von Schneekristallen.« Ins Deutsche übertragen S. 71.

Nr. 12. U. Nakaya, M. Hanazima und K. Dezuno: Experimental researches on window hoar crystals, a general survey. A. a. O. Vol. III, S. 1 (1939).

»Experimentelle Untersuchungen über Fensterreifkristalle. Allgemeine Übersicht.« Ins Deutsche übertragen S. 129.

Nr. 13. Z. Yosida: Window hoar crystals on clean glass surfaces. A. a. O. Vol. III, S. 43 (1940).

»Fensterreifkristalle auf reinen Glasflächen.« Ins Deutsche übertragen S. 147.

Nr. 14. Z. Yosida: A method of determining the thaw water content in snow layer. A. a. O. Vol. III, S. 91 (1940).

»Eine Methode zur Bestimmung des Schmelzwassergehalts in der Schneedecke.«

Bemerkung: In der folgenden Inhaltsübersicht und in der Übertragung werden die Arbeiten unter ihrer Nummer zitiert und durch eckige Klammern gekennzeichnet.

Kurze Übersicht über den Inhalt der Arbeiten

Beobachtungsort. Die Schneebeobachtungen, über welche in den aufgezählten Abhandlungen berichtet wird, fanden in Sapporo und am Mt. Tokati, die experimentellen Arbeiten vorwiegend in Sapporo statt. Sapporo ist die Hauptstadt von Hokkaido, der nördlichen Insel der japanischen Inselgruppe, und Sitz der Kaiserlichen Hokkaido-Universität, welcher Professor Nakaya angehört. Das winterliche Klima von Hokkaido ist verhältnismäßig kalt, Schneefall ist häufig, so daß die Verhältnisse für Schneebeobachtungen besonders günstig liegen. Etwa in der Mitte der Insel erhebt sich der Mt. Tokati (2063 m ü. d. M.), in dessen halber Höhe (1030 m ü. d. M.) ein großer Teil der Untersuchungen ausgeführt wurde. Während der Schnee in Sapporo meist in Flockenform fällt, was die Beobachtung erschwert, kommen am Mt. Tokati vorwiegend schöne Einzelkristalle vor, die unter den dort herrschenden günstigen Temperaturbedingungen (Wintertemperatur um -10° C, wenig schwankend) eingehend untersucht werden können.

a. Die Arbeiten zur Systematik der Schneeformen

[1], [2], [7], [8]

Die Untersuchungen begannen 1933 mit der systematischen Beobachtung der Schneekristalle bei den verschiedenen Schneefällen [1] und sollten für eine Reihe von Jahren durchgeführt werden. Das ausdrückliche Ziel war, Beziehungen zwischen den Wetterbedingungen und der Struktur des Schnees zu finden. Zunächst mußte ein Überblick über die vorkommenden Formen gewonnen werden. Dies geschah anfangs an Hand der Klassifikation von Humphreys, die sich jedoch bald als nicht ausreichend erwies, da sie die Kristalle von Idealform bevorzugt und die unregelmäßigen Teilchen nicht berücksichtigt. Trotzdem sich naturgemäß nach dem ersten Beobachtungsjahr noch keine abschließenden Aussagen machen ließen, so war doch schon 1934 das Material für eine vorläufige neue Schneeklassifikation zusammengetragen und in *practically* vollen Aufnahmen festgehalten [2]. Über die gesamten Ergebnisse der Untersuchungen auf dem Gebiet der Formensystematik berichtet dann 1936 die zusammenfassende Arbeit [3] »Allgemeine Klassifikation der Schneekristalle usw.«, welche in der hier in Übersetzung gebotenen Auswahl an erster Stelle steht, da sie in ihren Tafeln einen vorzüglichen Überblick über den Formenreichtum des natürlichen Schnees vermittelt und dabei gleichzeitig über die Ergebnisse der Schneestatistik orientiert. Im Anschluß an [3] folgt die Übertragung der interessanten Arbeit über die unregelmäßigen Schneekristalle und Graupeln [7], welches manches Licht auf den Bildungsmechanismus der Schneeteilchen wirft.

b. Die Arbeiten über die physikalischen Eigenschaften der Schneeteilchen [3], [4]

Parallel zu den Schneebeobachtungen liefen Arbeiten von mehr experimenteller Natur, die den Zweck hatten, wichtige physikalische Eigenschaften der verschiedenen Schneeteilchen zu erfassen. Im Hinblick auf die Theorie der Gewitterelektrizität war die elektrische Natur der Schneeteilchen von Interesse, denen von verschiedenen Autoren elektrische Ladungen mit entgegengesetztem Vorzeichen zugeschrieben wurden. Die in [3] beschriebenen Versuchsergebnisse zeigen, daß die Schneeteilchen positiv oder negativ geladen sein können. Bei Schneekristallen ohne angelagerte gefrorene Wassertröpfchen scheinen die negativen Ladungen, bei solchen mit Vergraupelungsspuren die positiven zu überwiegen. Wichtig sind die Messungen der Masse, Größe und Fallgeschwindigkeit individueller Schneeteilchen, über welche [4] berichtet. Diese Arbeit ist hier in dritter Stelle aufgenommen; sie gibt zum erstenmal Einblick in den Zusammenhang zwischen der Größe, der Masse und der Fallgeschwindigkeit der wichtigsten Schneeformen. In diesem Zusammenhang ist auch die in [8] enthaltene Statistik der Kristallgrößen zu beachten.

c. Die Analogie zwischen Schnee- und Reiskristallen [5], [6], hier nicht wiedergegeben

Der natürliche Schnee bildet sich in der freien Atmosphäre. Seine Entstehung entzieht sich bis heute der unmittelbaren Beobachtung, doch bietet sich im Reif eine verwandte Erscheinung, deren Untersuchung einfacher ist. Nakaya stellt zwischen den Kristallen des Schnees und denen des Reifs eine weitgehende Analogie fest, wobei der Begriff Reif in erweitertem Sinn zu verstehen ist und Raureif und Raufrost mit umfaßt [5]. Zu jeder Schneeform läßt sich eine entsprechend gestaltete Reifbildung nachweisen. Die Übereinstimmung erstreckt sich bis auf Einzelheiten. Nur die dendritischen Skelettförmigen des Reifs scheinen eine Ausnahme zu machen, bei ihnen pflegt die Feinstruktur zu fehlen, die an den frisch gefallenen dendritischen Schneesternern auffällt. Doch läßt sich dies als eine Umbildungserscheinung leicht erklären. Auf Grund dieser Analogie lag es nahe, die Bildungsgesetze der Schneekristalle am willkürlich hervorruftbaren Reif zu studieren, d. h. die verschiedenen Reifformen unter reproduzierbaren Bedingungen zu züchten. Über die ersten Versuche in dieser Richtung berichtet [6], ihre Weiterentwicklung führte zur Züchtung künstlicher Schneekristalle.

d. Die Versuche zur Züchtung künstlicher Schneekristalle [10], [11]

Das Prinzip des Geräts, in dem die japanischen Forscher künstlichen Reif erzeugten und das in der hier nicht aufgenommenen Arbeit [6] beschrieben ist, ist sehr einfach und liegt auch den späteren Apparaten für Schneekristallzüchtung ([10], [11]) zugrunde. Nakaya verwendet ein geschlossenes Gefäß, in dem eine dauernde Zirkulation durch lokale Abkühlung von oben her und Beheizung von unten erzeugt wird. Die Abkühlung erfolgt durch die gekühlte Deckplatte des Geräts, die Erwärmung über einen am Boden befindlichen Wasserbehälter, dessen Wassergehalt durch eine Heizeinrichtung auf gewünschter Temperatur gehalten wird. Das warme Wasser erwärmt die darüberliegende Luft und sättigt sie gleichzeitig mit Wasserdampf. Durch die Konvektion wird laufend wärmefuchte Luft in die Höhe geführt, die sich oben durch Mischung mit kälterer Luft und durch Berührung mit der kalten Wand abkühlt und in den Zustand der Übersättigung kommt. Die Deckplatte überzieht sich dabei mit künstlichem Reif. Reifkristalle bilden sich auch an Fäden und Haaren, an denen der Strom der übersättigten Luft vorbeistreicht. Durch geeignete Vorkehrungen läßt sich die Kristallbildung am aufgehängten Haar auf wenige Keimstellen beschränken. In diesem Fall können sich die Kristalle allseitig gleichmäßig entwickeln, sie entsprechen dann nach Form und Struktur den Kristallen des natürlichen Schnees [10]. Bei den ersten Versuchen wurde das Gerät durch flüssige Luft bzw. durch ein Kältebad gekühlt, seit 1936 steht den Forschern ein besonderes Kälte Laboratorium zur Verfügung, dessen Kältekammer eine Größe von $4 \times 4 \times 4$ m besitzt und bis auf -50° C abgekühlt werden kann. Die Apparate für Schneekristallzüchtung werden in dieser Kammer aufgestellt und ihre Kühlung erfolgt selbsttätig durch Vermittlung der kupfernen Deckplatte, die den Wärmeübergang zwischen dem Raum des Gefäßes und der Luft der Kältekammer ermöglicht.

Ein vorläufiger, hier nicht aufgenommener Bericht [10] brachte die ersten Angaben über die Züchtung künstlicher Schneekristalle, einschließlich solcher aus schwerem Wasser. Doch erst in der folgenden Arbeit [11] wird das ganze Beobachtungsmaterial dargestellt und eine Fülle von Erfahrungen mitgeteilt, deren Bedeutung erst die Zukunft richtig erweisen wird. Dieser zusammenfassende Bericht [11] ist hier wiedergegeben, es mag daher genügen, auf einige wenige Punkte hinzuweisen. Nakaya charakterisiert die Bildungsbedingungen der Kristalle durch zwei Kennwerte, deren Bedeutung eng mit der Konstruktion des der Kristallzüchtung dienenden Apparats zusammenhängt, nämlich durch die Temperatur

der Wärme- und die der Kältequelle, d. h. durch die Temperatur des warmen Wassers im Behälter (T_w) und die des kalten Außenraumes (T_a). Zu diesen Angaben tritt noch als mehr statistisch zu wertende Größe die Temperatur an der Bildungsstelle des Kristalls (T_s). Auch wenn es bis heute noch nicht möglich ist, die physikalischen Zustandsbedingungen, unter denen sich eine bestimmte Form bildet, aus diesen Kennwerten explizit abzuleiten, so ist durch die Versuche von Nakaya doch eindeutig bewiesen, daß die ganze Mannigfaltigkeit der Schneeformen, welche sich in der allgemeinen Klassifikation der Schneekristalle so eindrucksvoll zeigt, in normaler Luft ohne irgendwelche hypothetischen Gase oder sonstige zufällige Luftbeimischungen nur durch die Unterschiede der Temperatur, des Wasserdampfgehalts und der Konvektion zustande kommt, wobei der Keimanlage des Kristalls noch ein gewisser Einfluß zugestanden werden muß.

e. Die Untersuchung der Eisblumen

[12], [13]

Bei der Züchtung der Schneekristalle bleibt der Ablauf der Eiskeimbildung rätselhaft. Es läßt sich nur feststellen, daß zur Bildung der eisförmigen Phase eine Ansatzstelle, ein Kern, nötig ist, wozu voraussichtlich nur ein fester Körper dienen kann. Um dieses Problem einer Klärung näher zu bringen, untersuchte Nakaya mit seinen Mitarbeitern die Entstehung der Eisblumen, bei denen es sich ja um eine Eisbildung auf fester Unterlage handelt. In zwei bemerkenswerten Arbeiten [12] und [13] wird über die Ergebnisse berichtet. Die Arbeit von Yoshida [13] bringt die ersten Versuche mit individuellen Eiskernen. [12] und [13] sind in der vorliegenden Übertragung enthalten.

f. Arbeiten zur Physik der Schneedecke

([9], [14] hier nicht wiedergegeben)

Die besprochenen Arbeiten bezogen sich alle auf die Physik der Schneebildung. Nicht weniger wichtig ist die Erforschung des gefallenen Schnees, der Schneedecke und ihrer Metamorphose. Unter dem Titel »Physik des Skilaufs« [9] wird darüber zusammenfassend berichtet. Die letzte Veröffentlichung [14] behandelt ein wichtiges Teilproblem, die Frage des Schmelzwassergehalts der verschiedenen Schichten der tauenden Schneedecke.

In der vorliegenden Übertragung konnten nicht sämtliche Arbeiten aufgenommen werden. Trotzdem durften die übersetzten Abhandlungen nicht zu lückenhaft wirken, sie sollten vielmehr eine gedankliche Einheit bilden, was sich durch Beschränkung auf die zusammenfassenden Berichte über natürliche und künstliche Schneekristalle ermöglichen ließ. Damit entfielen die Arbeiten über die Physik der Schneedecke [9] und [14], ebenso konnten die beiden ersten Beiträge zur Formensystematik [1], [2] sowie die frühen Arbeiten über den Reif und die Züchtung der Reif- und Schneekristalle [5], [6], [10] weggelassen werden. Gewisse entstandene Lücken sucht der vorausgehende Überblick über das Gesamtwerk zu überbrücken.

Die Reihenfolge der hier aufgenommenen Abhandlungen ([1], [7], [8], [11], [12], [13]) wurde etwas geändert. Nach Wegfall der vorläufigen Klassifikation [2] empfahl es sich, die allgemeine Klassifikation [3] an die erste Stelle zu rücken, damit der Leser sofort einen Überblick über die Schneeformen enthält, von denen in allen übrigen Arbeiten die Rede ist. Als Ergänzung folgt [7]. Anschließend dient [14] zur Illustration der physikalischen Eigenschaften der wichtigsten Schneekristalltypen. Die restlichen Arbeiten folgen in ihrer ursprünglichen chronologischen Ordnung.

E. Wall, Friedrichshafen a. B.