

## Schnee als kristallines Aggregat

Von M. DE QUERVAIN, Davos-Weißfluhjoch<sup>1</sup>

### 1. Einleitung

In der Schnee- und Gletscherforschung ist in zunehmendem Maße die Erkenntnis durchgedrungen, daß die Entstehung der Schneedecke, ihre weitere Entwicklung zum Firn und zum kompakten Gletschereis, wie auch die ganze Schnee- und Gletscherdynamik nur unter Berücksichtigung der kristallinen Natur des Materials zu verstehen sind.

Ein Zweig dieser Forschung befaßt sich daher zunächst mit der Bildung und Umformung des einzelnen Schnee- und Eiskristalls, um schrittweise zum Kristallverband und zum äußerlich homogenen Schnee- und Eiskörper überzugehen. In der Schweiz ist dieses Vorgehen auf die Anregung von P. NIGGLI<sup>2</sup> vor zirka 10 Jahren eingeschlagen und seither unter seiner Beratung weiter verfolgt worden. Die Untersuchungen sind aber nicht nur von alleinigem Interesse für die Schneeforschung, sondern sie stehen auch in Beziehung zur aktuellen Erforschung anderer kristalliner Aggregate, z. B. der Metallwerkstoffe, und empfangen von dieser Seite wertvolle Impulse. Es ist umgekehrt nicht ausgeschlossen, daß gewisse Erkenntnisse, die sich am Schneeaggregat gewinnen lassen, auch von der Werkstoffkunde verwendet werden können.

### 2. Aus der ersten Entwicklungsphase des Schnees

Wir übergehen das von zahlreichen Forschern bearbeitete spezielle Gebiet der atmosphärischen Eiskeimbildung und setzen unsere Betrachtung im Moment ein, da der Schneekristall bereits als Plättchen oder Nadel in der Luft schwebend wahrgenommen werden kann. Bei einer Größe von zirka  $50\mu$  beginnt er merklich zu sinken und gerät dabei unter stets neue Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen, die ihrerseits das weitere Wachstum bestimmen. In der bei der Ablagerung auf dem Boden schließlich erreichten Endform sind also alle auf dem Fallweg angetroffenen Verhältnisse integriert. Am häufigsten ist als Endprodukt der dendritische Schneestern anzutreffen. (Dieser ist trotz seiner reichgegliederten Gestalt ein Einkristall, nicht etwa eine Kombination von stengeligen Formen, wie von Unkundigen gelegentlich angenommen wird.)

Dendritisches Kristallwachstum ist allgemein ein Kennzeichen großer Anisotropie in der Wachstumsgeschwindigkeit und starker Übersättigung der den Kristall umgebenden Mutterphase<sup>1</sup>. Hält die Stoffzufuhr durch Diffusion mit der Stoffabscheidung nicht Schritt, so bilden sich an den Wachstumsstellen Konzentrationsgradienten aus, und diejenigen Teile des Kristalls werden im weiteren Wachstum bevorzugt, die in den übersättigten Dampf- oder Lösungsraum hineinragen, beim Schneekristall also die sechs in den Richtungen der Nebenachsen vorstoßenden Äste.

Hinsichtlich der Wachstumsbedingungen ist die Formentwicklung des Schneekristalls sehr labil. Entweder entstehen dünne Plättchen bzw. Sterne, deren Durchmesser sich zur Dicke ungefähr verhalten wie 1:50, oder dann Nadeln (meist Hohlprismen). Die isometrischen Zwischenformen sind dagegen selten zu beobachten. Welches im einzelnen die Bedingungen sind, die zu den verschiedenen Formen führen, ist zurzeit nur qualitativ bekannt. Dem japanischen Forscher NAKAYA<sup>2</sup> und seinen Mitarbeitern ist es gelungen, eine Anzahl der in der Natur vorkommenden Kristalltypen im Laboratorium zu züchten und die dazu erforderlichen Temperaturen und Feuchtigkeiten roh anzugeben. Abgesehen davon, daß es sehr schwierig ist, die Temperatur und Feuchtigkeit am wachsenden Keim genau zu messen, kranken die laboratoriums-mäßigen Wachstumsversuche noch an dem Umstand, daß der Keim festgehalten werden muß und sich nicht wie in der Natur in freiem Schweben entwickeln kann. Die regelmäßige Dampfströmung an den Wachstumsstellen wird dadurch gestört, und Verzerrungen sind unvermeidlich. Aber auch die Natur liefert nur bei ganz bestimmten atmosphärischen Verhältnissen, wie sie im Laufe eines Winters nur dann und wann eintreten, wirklich vollkommen regelmäßige Formen.

Zwillings- oder gar Viellingsbildungen, dann auch Halbbildungen von trigonaler Gestalt, kommen, wenn auch wenig beachtet, im fallenden Schnee häufig vor. Sekundäre Einflüsse erweitern noch den Formenspielraum. Allbekannt ist die Vergraupelung des Schneekristalls bei nebligem Wetter und das Zusammen-

<sup>1</sup> A. PAPAPETROU, Untersuchung über dendritisches Wachstum von Kristallen. Z. Kristallogr. 92, 89 (1935).

<sup>2</sup> M. NAKAYA und Mitarbeiter, Untersuchungen über natürliche und künstliche Schneekristalle. Übersetzung: Mitteilungen der deutschen Akademie f. Luftfahrtforschung. Bd. 2 (1942).

<sup>1</sup> Eidg. Institut f. Schnee- und Lawinenforschung.

<sup>2</sup> NIGGLI, BADER, HAEFELI, BUCHER, NEHER, ECKEL, THAMS, Der Schnee und seine Metamorphose (Beiträge z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Zürich 1939).

backen einer Anzahl von Kristallen zu unförmlichen Flocken bei hoher Temperatur. In höheren Lagen spielt ferner der Wind eine bedeutende Rolle, unter dessen Wirkung die an sich recht widerstandsfähigen Dendriten zu Staub zermahlen werden können.

Mit diesen kurzen Hinweisen auf die Vielfalt der Formentwicklung soll gezeigt werden, daß der sich ablagernde Schnee von Anfang an ein uneinheitliches Material darstellt. Dementsprechend besitzt die Schneedecke eine charakteristische, geschichtete Struktur, die sich über Monate hin erhalten kann. Mehr noch als die Entstehung der Formen in der Atmosphäre interessieren jedoch die Veränderungen, die der Schneekristall nach seiner Ablagerung als Bestandteil des Schneeaggregates erleidet, denn diese bestimmen weitgehend die Eigenschaften der Schneedecke.

### 3. Die kristalline Metamorphose in der Schneedecke

Wenn wir die Entwicklung einer bestimmten homogenen, horizontalen Schneeschicht verfolgen, die z. B. einen von Schönwetterperioden umrahmten Schneefall umfaßt, so stellen wir äußerlich als augenfälligste Veränderung eine zeitlich abklingende Abnahme der Schichthöhe fest. Hand in Hand mit ihr geht eine Erhöhung des Raumgewichtes, das zunächst demjenigen des Firms zustrebt (um  $0,6 \text{ g/cm}^3$ ) und unter der Mitwirkung flüssiger Phase schließlich den Wert des kompakten Eises erreicht ( $0,9 \text{ g/cm}^3$ ). Die Verdunstung scheint dabei, zum mindesten im Hochwinter, von untergeordneter Bedeutung zu sein. Wie BILLWILER<sup>1</sup> bereits festgestellt hat, kann die Gesamtbilanz im Wasserdampfaustausch zwischen Schneedecke und Atmosphäre zeitweise sogar zugunsten der Schneedecke ausfallen, indem bei gewissen atmosphärischen Verhältnissen die Kondensation überwiegt. Der in kalten, klaren Nächten gebildete Oberflächenreif legt davon sichtbar Zeugnis ab. Im Frühling ist natürlich das Absinken der Schneehöhe auf Substanzverlust zurückzuführen (Verdunstung und Schmelzen), doch fällt diese Erscheinung in den Höhenlagen zwischen Wald- und Firngrenze, wo die Schneebeziehungen im Hinblick auf die Entstehung der Lawinen besonders eingehend untersucht werden, erst von zirka Mitte April an ins Gewicht. Neuere Beobachtungsmaterial zu diesen für die Wasserwirtschaft wichtigen Fragen wird demnächst von O. LÜTSCHEG<sup>2</sup> veröffentlicht und besprochen werden. Wir wollen uns hier mit der eigentlichen *Setzung* des Schnees befassen, die mit einer Raumgewichtszunahme identisch ist.

Als treibende Kraft für die Setzung erkennt man vorerst das Eigengewicht des Schnees. Genauere Untersuchungen zeigen, daß auch interkristalline Kräfte

im Schnee selbst aktiv sind und ein Schwinden des Materials bewirken. Die Ursache für diese letztgenannte Erscheinung liegt in der *Metamorphose* des Schneekristalls. Die stengeligen und dendritischen Formen werden zurückgebildet und in zunehmend isometrische Formen von kristallographisch schwer zu bestimmender Begrenzung übergeführt. In bodennahen Schichten bauen sich gleichzeitig neue, lose zusammenhängende Kristallindividuen auf, ausgezeichnet durch ihre kantige, oft becherförmige Gestalt, und bilden den sogenannten «Tiefenreif». Es ist klar, daß sich bei diesem Umbau das Aggregat als Ganzes verdichten muß, da das anfänglich sperrige, sehr poröse Gefüge ähnlich demjenigen eines Sandhaufens wird.

Welches sind nun aber die treibenden Kräfte der Metamorphose? Man wird zunächst versuchen, die bekannten Theorien über den Kristallauf- und -abbau von KOSSEL<sup>1</sup>, STRANSKI, VOLMER u. a. beizuziehen. Diese besagen, daß die Arbeit, welche notwendig ist, um ein Molekül von der Oberfläche eines Kristalls loszureißen, vom Platz abhängt, an dem das betreffende Molekül sitzt. Ecken, Kanten und Flächen repräsentieren unterschiedliche Ablösungsarbeiten; dementsprechend sind die Dampfdrucke eines Kristalls über seinen Ecken, Kanten und Flächen ungleich. Befindet sich also ein Kristall als Ganzes in einem statistischen Gleichgewicht mit der ihn umgebenden Dampfphase, so kann diese gleichwohl in bezug auf gewisse Kanten und Ecken untersättigt und in bezug auf gewisse Flächen übersättigt sein, und die Folge ist eine Umlagerung im Sinne einer Reduktion der Ecken und Kanten. Doch führt dieser Prozeß anscheinend nicht sehr weit, denn sobald einmal die spezifischen Kanten- und Eckplätze frei sind, muß der Abbau auch auf die Flächen übergreifen, sofern noch eine Untersättigung besteht. Bei solch einem stufenweisen Abbau bleibt die kristallographische Formbegrenzung einigermaßen erhalten.

Das tatsächliche Bild der Metamorphose, wie es sich an mikroskopischen Präparaten von Schneekristallen verfolgen läßt, zeigt nun, daß sich die an Modellen von Idealkristallen entwickelten Theorien nicht ohne weiteres auf unser Problem übertragen lassen. Typisch für die Metamorphose ist zunächst das Verschwinden des Reliefs, dann eine *Abrundung* der Kanten und Flächen und schließlich die Rückbildung oder *Ab-schnürung* von Neben- und Hauptästen (Fig. 1). Diese Formänderungen erwecken ganz den Eindruck, als wäre eine Oberflächenspannung am Werk. Will man aber diesen Begriff anwenden, so ist man genötigt, der Oberfläche des Schneekristalls eine flüssigkeitsähnliche, amorphe Struktur zuzugestehen. Die Ablösarbeit eines Wassermoleküls bzw. der Dampfdruck würde sich somit weniger aus der Gitterenergie eines Idealkristalls, unter Berücksichtigung der speziellen

<sup>1</sup> O. BILLWILER, Der Wasseraustausch zwischen der Luft einerseits und Schnee und Eis andererseits im Gebirge. Annalen d. Schweiz. Meteorol. Zentralanstalt (1918).

<sup>2</sup> O. LÜTSCHEG, Wasserhaushalt der Schweiz im Hochgebirge, 1. Bd., 1. Teil (erscheint demnächst).

<sup>1</sup> Zum Beispiel KOSSEL, Über Kristallwachstum, Naturw. 44, 901 (1930).

Oberflächenlage, berechnen lassen, als aus der Krümmung der Oberfläche und der Oberflächenspannung nach der bekannten Gleichung von GIBBS-THOMSON

$$\ln \frac{p_r}{p_\infty} = \frac{2\sigma M}{r \rho R T}$$

$p_r$  und  $p_\infty$  = Dampfdruck über der gekrümmten Fläche mit dem Krümmungsradius  $r$  bzw.  $\infty$  (Ebene)

$\sigma$  = Oberflächenspannung

$M, \rho, R, T$  in der üblichen Bedeutung.

An den stärker gekrümmten Flächen (mit sehr kleinen Krümmungsradien) würde also Substanz abgebaut und an weniger gekrümmten wieder angesetzt, bis in

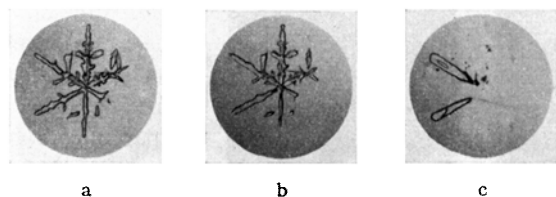


Fig. 1. Metamorphose eines Schneekristalls, eingeschlossen in seine Gleichgewichtsatmosphäre bei  $-10^\circ\text{C}$ . Alter im Stadium a: 8 Tage, Stadium b: 16 Tage, Stadium c: 100 Tage. Durchmesser des Kristalls in frischem Zustand 1 mm.

der Kugelform das Gleichgewicht erreicht ist. Kleine Kugeln müßten sich zugunsten größerer auflösen. Nun spielt sich ja die Schneemetamorphose bei Temperaturen in der Nähe des Schmelzpunktes ab. Das Kristallgitter befindet sich infolge der stark angeregten thermischen Schwingungen in einem Zustand der Auflockerung. Der Dampfdruck ist, verglichen mit demjenigen hochschmelzender Kristalle, sehr hoch und nicht mehr wesentlich verschieden von dem der unterkühlten flüssigen Phase. Im Hinblick darauf erscheint die Annahme, daß sich die Kristalloberfläche in einem flüssigkeitsähnlichen Zustand befindet, gerechtfertigt. BADER<sup>1</sup> hat daher bereits versucht, die Instabilität des Neuschneekristalls auf diese Weise zu erklären.

Wenn wirklich ein quasi kristalliner, flüssigkeitsähnlicher Oberflächenfilm vorhanden ist, sollte auch eine Substanzverschiebung längs der Oberfläche möglich sein. Einzelne Beobachtungen scheinen auch in der Tat darauf hinzudeuten, daß derartiges eintritt. Trennt man nämlich einen Kristall von der Dampfphase ab, indem man ihn in eine wasserunlösliche Flüssigkeit (z. B. Paraffinöl) einbettet, so sind bei  $-5^\circ\text{C}$  gleichwohl Anzeichen einer Umlagerung festzustellen. Bei tieferen Temperaturen dagegen, bei denen die Metamorphose über den Dampf noch aktiv wäre, kann sich ein eingebettetes Präparat monatelang ohne nennenswerte Veränderungen erhalten (Fig. 2).

<sup>1</sup> NIGGLI, BADER, HAEFELI, BUCHER, NEHER, ECKEL, THAMS, Der Schnee und seine Metamorphose (Beiträge z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Zürich 1939).

Mit diesen im Sinne der Hypothese ausfallenden Experimenten wird die Erscheinung der Metamorphose aber noch nicht erschöpfend erfaßt. Nachdem im Verlauf einiger Tage oder Wochen — die Umwandlungsgeschwindigkeit hängt stark von der Temperatur ab — eine scheinbar stabile Endform mit rundlichen Elementen erreicht ist, tritt sonderbarerweise wieder ein langsam verlaufender aufbauender Prozeß in den Vordergrund. Der Kristall beginnt sich gleichsam an seine hexagonale Gitterstruktur zu erinnern und die getrennten Bestandteile bilden sich zu scharf begrenzten prismatischen Plättchen um (Fig. 1c). Diese Beobachtung wurde vorerst einmal in einem Kältelaboratorium gemacht, dessen Temperatur von  $-10^\circ\text{C}$  in einem Bereich von zirka  $\pm 1^\circ\text{C}$  stabilisiert war. Möglicherweise ist gerade diese Schwankung für die Weiterführung der Metamorphose maßgebend.

Wie bereits erwähnt, besitzen die groben Altschneekristalle der tieferen Schneelagen kantige Formen. Stellt man sie den Neuschneekristallen gegenüber, erkennt man, daß sie in der kristallographischen Flächenbegrenzung nicht sehr von diesen verschieden sind. Stets sind das Basispinakoid  $\langle 0001 \rangle$ , das Prisma  $\langle 10\bar{1}0 \rangle$  und Pyramiden  $\langle 10\bar{1}1 \rangle$  zu finden. Der Unterschied zwischen Anfangs- und Endform liegt letzten Endes im prozentualen Anteil, den die verschiedenen Formelemente einnehmen und im unterschiedlichen Verhältnis von Oberfläche und Gesamtkantenlänge zum Volumen. Die Forminstabilität reicht also nicht aus, den Aufbau des grobkörnigen Altschnees zu erklären.

Die Laboratoriumsversuche zeigen, daß bei zeitlich und örtlich konstanter Temperatur die Metamorphose des Kristalls im Aggregat nicht sehr weit über das Stadium hinausführt, das in Figur 1b zu sehen ist. Feinkörniger Schnee, unter Luftabschluß bei konstanter

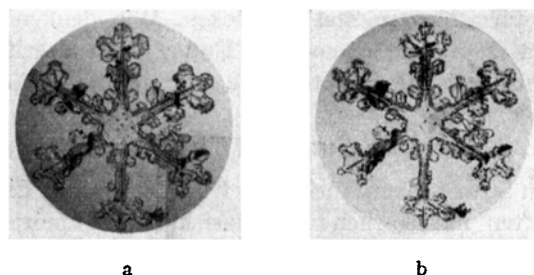


Fig. 2. Schneestern, konserviert in Paraffinöl ( $T = -10^\circ\text{C}$ ) a) Alter 25 Tage, b) Alter 105 Tage. Vergrößerung 8mal.

Temperatur aufbewahrt, bleibt monatelang feinkörnig, und grobkörniger Schnee erhält sich unter den gleichen Bedingungen ebenfalls nahezu unverändert, während sich in der Natur die Tiefenreifbildung unter Umständen im Verlauf von zirka 10 Tagen vollziehen kann. Offenbar werden die weiteren Umkristallisationsprozesse erst unter der Wirkung von Temperaturschwankungen und örtlichen Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Dem zusammenhängenden Porensystem der

Schneedecke, das ein feines Wechselspiel von Diffusions- und Konvektionsdampfströmungen zuläßt, kommt dabei eine große Bedeutung zu.

Im natürlichen Schneeprofil stellt der Boden im Hochwinter gewöhnlich die wärmste Stelle dar. Die Porenluft der bodennahen Schichten vermag daher am meisten Wasserdampf aufzunehmen und umzusetzen. So wird die besonders intensive Auflockerung und Umgestaltung gerade dieser Schichten verständlich. In einem Laboratoriumsversuch kann die Bedeutung eines Temperaturgradienten direkt nachgewiesen werden. Figur 3 zeigt drei Kornproben aus einem Schneezylinder, in dem während einer Woche ein Temperaturgradient von zirka  $15^{\circ}\text{C}/\text{m}$  aufrechterhalten wurde (Bodentemperatur =  $0^{\circ}\text{C}$ ). Die Unterschiede in der Korngestalt zwischen den drei Proben, die an der Basis (a), in 40 cm Höhe (b) und in 80 cm Höhe (c) entnommen wurden, sind sehr deutlich.

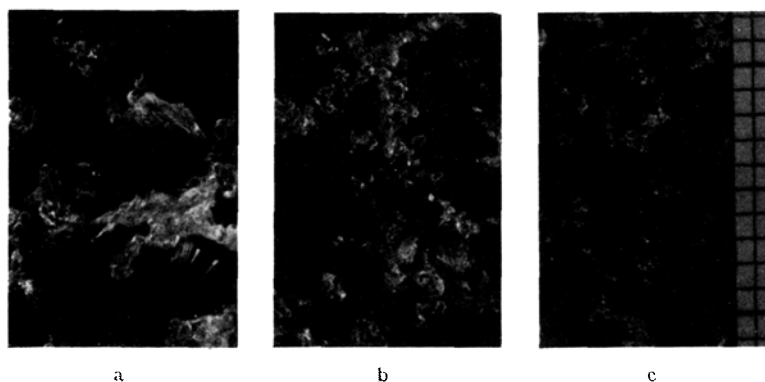


Fig. 3. Korndifferenzierung unter der Wirkung eines künstlichen Temperaturgradienten. Versuchsdauer: 10 Tage. Ausgangsmaterial: filziger Neuschnee.

- a) Probe aus 5 cm Höhe ( $T \approx -1^{\circ}\text{C}$ )
- b) Probe aus 40 cm Höhe ( $T \approx -6^{\circ}\text{C}$ )
- c) Probe aus 80 cm Höhe ( $T \approx -9^{\circ}\text{C}$ )

(Der Größenmaßstab ist aus der mm-Teilung in Figur 3c ersichtlich.)

Im übrigen soll hier die Frage der Schneemetamorphose, die, soweit sie die Formstabilität des Neuschneekristalls betrifft, von allgemeinem Interesse ist, nicht weiter verfolgt werden. Es ist indessen klar, daß sie alle Vorgänge in der Winterschneedecke beherrscht, besonders wenn sie sich über längere Zeit erstrecken. Wir denken vor allem an die neue, noch in Entwicklung begriffene Schneemechanik (HAEFELI<sup>1, 2</sup>).

#### 4. Schneeplastizität und Kristallplastizität

Im Schnee überschneiden sich rein kristalline Eigenschaften mit solchen von quasi kristallin-amorphen, flüssigen und gasförmigen Substanzen. Als Ganzes stellt das System Eis–Wasser–Wasserdampf daher einen Stoff von schwer zu definierender Konsistenz dar. Praktisch wichtig ist die plastische Verformbarkeit des Schnees, die aber im Gegensatz zu anderen plastischen Stoffen nicht nur die Form, sondern auch das Volumen erfaßt. Ob sie als reine Kristallplastizität anzusprechen oder ob sie auf ein Gleiten oder gar auf ein

Abrollen der Körner gegeneinander zurückzuführen ist, bildet zurzeit Gegenstand eingehender Untersuchungen.

Bekanntlich kommen die kristallinen Eigenschaften bei der Verformung eines polykristallinen Körpers darin zum Ausdruck, daß die plastische Deformation erst nach dem Überschreiten einer mehr oder weniger scharf ausgeprägten Grenzspannung (*Fließgrenze*) eintritt. Weiter nimmt die Verformungsgeschwindigkeit bei konstant gehaltener Spannung gewöhnlich ab, um schließlich bei einer bestimmten «Reckung» Null zu werden. Diese als *Verfestigung* bezeichnete Erscheinung, wird auf zunehmende Gitterstörungen in den Gleitebenen zurückgeführt. Nach einem längeren Unterbruch der Beanspruchung können diese Störungen ausheilen, so daß mit der gleichen Spannung wieder eine neue Reckung vorgenommen werden kann. Man spricht dann von einer *Erholung*.

Beim Eis-Einkristall sind diese Kriterien der Kristallplastizität zweifellos vorhanden.

Es fragt sich aber, ob sie auch am Schneeaggregat nachgewiesen werden können. Eine Reihe von Torsionsversuchen an Schneehohlzylindern diente neulich der Abklärung dieser Frage. Diese Art der Verformung wurde gewählt, um die nie zu unterbindende Bewegung der Probe unter der Eigenlast und dem kristallinen Formschrumpfen zu eliminieren. Figur 4 zeigt eine bei  $-10^{\circ}\text{C}$  aufgenommene Deformationskurve mit einem Unterbruch des Drehmomentes von 17 Stunden. Auf den ersten Blick scheinen Verfestigung und Erholung wirklich vorzuliegen. Verfolgt man indessen das Verhalten der Probe nach der Entlastung, so gewahrt man eine beträchtliche *elastische Nachwirkung*, d. h. die Verdrehung geht mit abklingender Geschwindigkeit teilweise wieder zurück. Dieser Effekt muß im umgekehrten Sinn auch bei der Belastung vorhanden sein und verursacht offenbar zu einem guten Teil die Erscheinung, die man zunächst als Verfestigung und Erholung ansprechen möchte. Damit ist ein von der Flüssigkeitsmechanik abweichendes Verhalten festgestellt, ohne daß aber Kristallplastizität beteiligt sein muß. Nach den Vorstellungen von BOLTZMANN, WERDENBERG und BECKER<sup>1</sup> hat die elastische Nachwirkung ihre Ursache in einer Parallelkopplung elastischer und

<sup>1</sup> NIGGLI, BADER, HAEFELI, BUCHER, NEHER, ECKEL, THAMS, Der Schnee und seine Metamorphose (Beiträge z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Zürich 1939).

<sup>2</sup> R. HAEFELI, Spannungs- und Plastizitätserscheinungen der Schneedecke, Schweizer Archiv f. angew. Wissensch. u. Techn. 9.—12. (1942).

<sup>1</sup> BECKER, Z. f. Phys. 33, 185 (1925).

plastischer Eigenschaften. Für das Schneee aggregat kann angenommen werden, daß einzelne Körner beim Anlegen einer Scherspannung elastisch beansprucht werden, während andere, speziell orientierte, in ihren Netzebenen oder an den Korngrenzen bereits plastisch fließen.

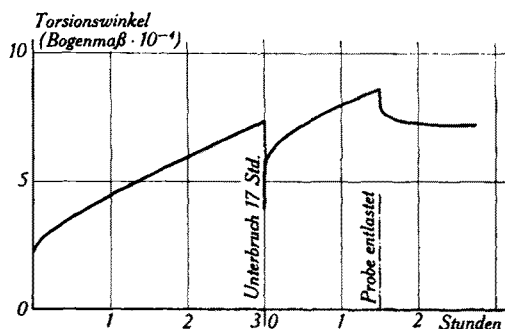


Fig. 4. Plastische Deformation eines Schneehohlzylinders bei einem konstanten Torsionsmoment von  $286 \text{ g} \cdot \text{cm}$  zum Studium der Verfestigung, Erholung und elastischen Nachwirkung. Temperatur  $\approx -10^\circ \text{C}$ . (Außendurchmesser des Zylinders:  $5,8 \text{ cm}$ ; Innendurchmesser:  $3,0 \text{ cm}$ . Länge:  $1 \text{ cm}$ . Material: feinkörniger Altschnee vom Raumgewicht  $0,342 \text{ g/cm}^3$ .)

Es überrascht nun, daß die Fließdiagramme (Abhängigkeit der nach einer bestimmten Zeit erreichten, quasi stationären Fließgeschwindigkeit vom Torsionsmoment) bis hinunter zu kleinsten Belastungen nahezu linear verlaufen (Fig. 5). Genauere Untersuchungen lassen bei Belastungen unterhalb  $20 \text{ g} \cdot \text{cm}$  noch ein Einbiegen gegen den Nullpunkt feststellen, doch fragt man sich, ob es da noch sinnvoll ist, von einer Fließgrenze zu sprechen.

Praktisch bedeutet das Ergebnis, daß z. B. eine Schneedecke vom Raumgewicht  $0,3 \text{ g/cm}^3$ , die wir um  $30^\circ \text{C}$  geneigt annehmen, von der Sohle bis mindestens  $5 \text{ cm}$  unterhalb der Oberfläche unter der hangparallelen Komponente des Eigengewichtes wie eine NEWTONsche Flüssigkeit fließen muß. Die Schneemechanik hat in dieser Hinsicht bisher mit Recht den Schnee als viskose Flüssigkeit behandelt.

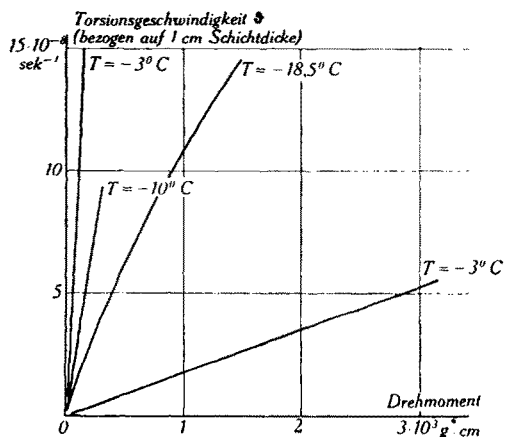


Fig. 5. Fließbewegung in einem Schneehohlzylinder in Funktion einer Torsionsbeanspruchung bei verschiedenen Temperaturen. (Abmessungen und Material des Versuchskörpers siehe Text zu Fig. 1.)

Ähnliche Probleme werden gegenwärtig auch in einem ganz anderen Forschungsgebiet, nämlich bei den Untersuchungen über die Warmverformung von Metallen unter Dauerbeanspruchung verfolgt<sup>1</sup>. Die Beziehungen zwischen Schnee und einem heißen Metallwerkstück liegen auf der Hand: in beiden Fällen handelt es sich um polykristalline Aggregate, bei denen die Nähe der Schmelztemperatur bereits Fließerscheinungen zuläßt. Noch enger werden die Beziehungen, wenn dem Metall porenfreies Eis gegenübergestellt wird. In den beiden Forschungsgebieten entsprechen sich die Untersuchungsmethoden weitgehend, sofern sie sich auf das plastische Verhalten der Untersuchungsobjekte beziehen. Langfristige Zug-, Druck- und Scherversuche dienen dem Studium der Bewegungsgesetze, während mikroskopische Untersuchungen von Dünnschliffen die Vorgänge im Bereich der Kristallite zu erfassen trachten. Die Herstellung von Eisdünnschliffen bietet keine Schwierigkeiten, wenn ein hin-

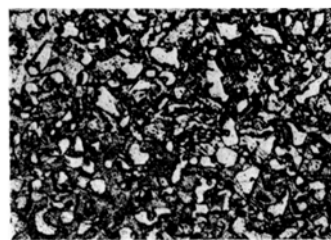


Fig. 6. Dünnschliff von feinkörnigem Altschnee (nach BADER). Vergrößerung 3mal.

reichend gekühltes Laboratorium zur Verfügung steht (zirka  $-10^\circ \text{C}$ ). Umständlicher ist hingegen das Arbeiten mit Schneedünnschliffen. Der Schnee muß zunächst möglichst ungestört in seiner natürlichen Struktur fixiert werden, bevor er einer mechanischen Bearbeitung unterzogen werden kann. BADER<sup>2</sup> hat zu diesem Zweck das Porenvolumen mit einer organischen Flüssigkeit ausgegossen (Tetrabromäthan), deren Schmelzpunkt hart am Gefrierpunkt des Eises liegt ( $+0,1^\circ \text{C}$ ), und die zudem unterkühlbar ist. Wenn man das Füllmittel durch Tiefkühlung erstarren läßt, kann das Präparat zu Plättchen von einigen Zehntelmillimeter Dicke geschliffen werden, ohne daß die einzelnen Körner ihre Form und Lage ändern. Als störender Einfluß läßt sich leider die Volumenänderung des Füllmittels bei der Erstarrung nicht ganz vermeiden. Figur 6 zeigt einen Schneedünnschliff nach BADER.

Die Dünnschliffe können ausgewertet werden zur statistischen Ermittlung der Kornorientierung im Schnee. Vor allem interessiert die Frage, ob mit einer

<sup>1</sup> W. SIEGFRIED, Spannungszustand und Bruch bei Kriechbeanspruchung, Schweizer Archiv f. angew. Wissensch. u. Techn. 1 (1943). Sprödigkeit und Zähigkeit von Metallen bei hohen Temperaturen. Schweizer Archiv 1. u. 2. (1945).

<sup>2</sup> NIGGLI, BADER, HAEFELI, BUCHER, NEHER, ECKEL, THAMS, Der Schnee und seine Metamorphose (Beiträge z. Geologie d. Schweiz, Geotechn. Serie, Zürich 1939).

mechanischen Deformation eines Schneekörpers auch eine Gefügeregelung verbunden ist. Die bisherigen Untersuchungen in dieser Richtung sind noch nicht weit gediehen, doch sind Anzeichen einer Einorientierung der Kristallachsen in die Hauptdeformationsrichtung in einigen Fällen sicher festgestellt worden. Entsprechende Untersuchungen, ebenfalls von BADER eingeleitet, sind im Hinblick auf die Eismetamorphose und den Fließmechanismus der Gletscher u. a. von U. R. WINTERHALTER<sup>1</sup> weitergeführt worden. Auch hier interessiert vor allem die Gefügeregelung, dann aber der Vorgang der Sammelkristallisation, der unter Mitwirkung von Druck und flüssiger Phase den Firn in das grobkörnige Gletschereis überführt.

Allen diesen kurz erläuterten Einzelercheinungen muß die Schneemechanik, die schließlich darauf ausgeht, die Spannungs- und Festigkeitserscheinungen in der Schneedecke zu erfassen und darzustellen, Rechnung tragen. Wohl sind Schnee und Eis, wenn man von ihrer mit der Ablagerung zusammenhängenden natürlichen Bänderung absieht, im großen gesehen, homogene Materialien. In ihrem Verhalten zeichnet

sich aber, gleich wie im Metall, in mancher Beziehung die inhomogene körnige Struktur und selbst die Anisotropie der kristallinen Körner ab.

#### Summary

The newly fallen snow exhibits in its large variety of form all the changes in the atmospheric conditions (temperature, moisture, wind), and is a divided, labile matter. After the deposit, the cubic weight increases through the dead weight and the intercrystalline forces. These latter are closely connected with the metamorphosis of the crystals of newly fallen snow, basing on a stability of form. It appears that the snow crystal is covered with a superficial layer of fluid-like properties, and that the surface expansion is responsible for the first phase of the transformation. For the further change into the coarse grained old snow temporal and local differences are necessary. This has been found by observation of nature and of laboratory experiments, and in both cases were the results the same. The snow aggregate possesses, as a whole, a remarkable plasticity; the relations of this latter to the crystal plasticity is, at present, being examined by means of deformation tests. Of the characteristics of the plasticity of crystals a certain firmness and recovery can be observed partly, however, obscured by an elastic after-effect up till now never observed in snow. Of a slow limit there is only a suggestion. Besides mechanical mensurations, microscopic tests are being made on thin grinding plates to get at the individual proceedings.

<sup>1</sup> U. R. WINTERHALTER, Schneebericht 1939/40 des Eidg. Institutes f. Schnee- und Lawinenforschung.

## Zur Chemotherapie der Tuberkulose

Von H. LEHR und H. BLOCH, Basel

Obwohl die Bemühungen, ein brauchbares chemotherapeutisches Heilmittel der Tuberkulose zu finden, bis jetzt zu keinem sichtbaren Erfolg geführt haben, so mag doch an dieser Stelle kurz über die Forschungsergebnisse der letzten Jahre referiert werden, da diese aus verschiedenerlei Gründen ein Interesse beanspruchen, das über das rein medizinische weit hinausgeht. Durch den Krieg und das Nachkriegselend hat die Tuberkulose in Europa eine Ausbreitung erfahren, die man in ihren wahren Ausmaßen vorerst bloß abzuschätzen vermag, die aber zweifellos ungeheuer groß ist und stets noch zunimmt. Für die betroffenen Völker bedeutet dies eine der Kriegswunden, die am langsamsten vernarben wird; die Aufgabe der Tuberkulosebekämpfung stellt sich ihnen als ein Problem für Generationen und ist dadurch nicht nur eine medizinisch-soziale, sondern vorab auch eine volkswirtschaftliche Frage erster Ordnung geworden. Was deshalb zu diesem Zeitpunkt eine leistungsfähige Chemotherapie der tuberkulösen Infektion bedeuten würde, ist leicht abzusehen.

Neben diesen allgemeinen sind es aber auch wissenschaftliche Gründe, die die Tuberkuloseforschung aus ihrem engen medizinischen Rahmen hinausgehoben und in einen weiteren naturwissenschaftlichen Zusammenhang gestellt haben. Insbesondere Chemie und Medizin haben sich hier eng verbunden, um durch gemeinsame Anstrengungen zum Ziel zu gelangen. Daß in diesem Fall eine solch enge Arbeitsgemeinschaft besonders wünschenswert erschien, liegt, wie wir sehen werden, in der Natur der tuberkulösen Infektion und ihres Erregers selbst begründet.

Es besteht hier nicht die Absicht, einen auch nur einigermaßen vollständigen Überblick über die Forschungsergebnisse der letzten Jahre zu geben. Lediglich ein kleines Teilgebiet soll etwas ausführlicher besprochen werden, allerdings ein Gebiet, auf dem viel gearbeitet wurde und das sich durch eine gewisse Einheitlichkeit der leitenden Grundgedanken auszeichnet. Wir werden versuchen, das Besondere, das diese Arbeiten verbindet, herauszustellen, denn außer dem aktuellen sachlichen Interesse, welches diese bieten, zeigen sie