

# Ueber die Plasticität der Eiskrystalle<sup>1</sup>.

Von

**O. Mügge** in Münster in Westf.

Mit Tafel IV und 8 Figuren.

---

Die Plasticität des Eises ist wegen ihrer grossen Bedeutung für die Erklärung der Gletscherbewegung vielfach Gegenstand der Discussion gewesen. Nach einer Angabe von PFAFF<sup>2</sup> hat zuerst KANE beobachtet, dass eine grosse, hohl liegende Eisscholle sich im Verlaufe einiger Monate durchbog. SCHLAGINTWEIT<sup>3</sup> kommt 1850 noch zu dem Resultat: „Das Eis zeigt überall, wo wir demselben begegnen, alle Eigenschaften eines festen, ja sogar spröden Körpers. Jene Verschiebbarkeit der Massen, welche wir am Gletscher aus Structur und Bewegung kennen, scheint durch die feine Zersplitterung des Eises bedingt zu sein, welche durch den Druck der bedeutenden Masse und ihre Reibung gegen die Unterlage entsteht.“ REUSCH<sup>4</sup> gelang es zwar (aber nur ein einziges Mal), eine dünne Eislamelle zwischen den Fingern zu biegen, auch beobachtete er die Durchbiegung einer auf zwei Schneiden gelegten 3 mm dicken und mit 180 g belasteten Platte innerhalb einer Stunde (während welcher aber die Temperatur mehrere Grade über Null stieg), sein Endergebniss ist aber

---

<sup>1</sup> Ein Auszug dieser Arbeit ist bereits veröffentlicht in den Nachr. d. K. Ges. d. Wiss. zu Göttingen. 1895. Heft 2.

<sup>2</sup> POGG. Ann. 155. 172. 1875.

<sup>3</sup> POGG. Ann. 80. 213. 1850.

<sup>4</sup> POGG. Ann. 121. 576. 1864.

doch, „dass das Eis selbst in einem dem Schmelzen ausserordentlich nahen Zustande vollkommen spröde ist, dass daher von einer Plasticität desselben auch entfernt nicht die Rede sein kann.“ Demgegenüber schliesst PFAFF<sup>1</sup> aus seinen Versuchen, „dass das Eis nicht absolut unnachgiebig gegen Dehnung und Zug sich verhält.“ Die Plasticität nimmt nach ihm mit der Annäherung an den Schmelzpunkt sehr zu, woraus sich erklärt, dass die Schnelligkeit der Gletscherbewegung mit der Temperatur steigt; nahe dem Schmelzpunkt genügt der geringste anhaltend wirkende Druck, um die Eistheilchen zu verschieben, es verhält sich dann wie Wachs. Die Versuche von PFAFF erscheinen nicht einwandfrei, Angaben über die Richtung des Druckes gegen die optische Axe fehlen. K. R. KOCH<sup>2</sup> bemerkte gelegentlich seiner Elasticitätsuntersuchungen am Eis, dass ein Eisstab von 314 mm Länge, 16,0 mm Breite und 7,8 mm Dicke, mit 200 g belastet, sich bei  $-15^{\circ}$  in etwa 3 Stunden um etwa 35 mm durchbog. Legte man den Stab um, so konnte er mit Leichtigkeit durch dasselbe Gewicht wieder gerade gebogen werden. Auch bei  $-25^{\circ}$  war diese Deformation noch bedeutend, indessen schien die Plasticität doch mit Annäherung an den Nullpunkt erheblich zuzunehmen. Angaben über die krystallographische Orientirung des Druckes fehlen zwar, indessen scheint es nach den Dimensionen des Stäbchens, dass der Druck auch hier senkrecht zur Oberfläche des Eises, also wahrscheinlich parallel zur optischen Axe wirkte.

Untersuchungen über die Plasticität des Eises mit Berücksichtigung der Orientirung des Druckes scheinen zuerst von Mc CONNELL<sup>3</sup> ausgeführt zu sein. Aus früheren<sup>4</sup>, zusammen mit D. A. KIDD angestellten Beobachtungen schien ihm zwar hervorzugehen, dass ein einzelner Eiskrystall nicht plastisch sei und dass die anscheinende Plasticität des Gletschereises auf Vorgänge an den Grenzflächen der Krystalle zurückzuführen sei; weitere Versuche führten ihn indessen zu einem ganz

<sup>1</sup> l. c. 170. — Über ähnliche Versuche von MATTHEWS, BIANCONI und STEENSTRUP vergl. die Angaben in HEIM'S Gletscherkunde p. 314 ff.

<sup>2</sup> WIEDEMANN'S ANN. 25. 438. 1885.

<sup>3</sup> Proc. Roy. Soc. 48. 259. 1890 u. ausführlicher das. 49. 323. 1891.

<sup>4</sup> Proc. Roy. Soc. 44. 331. 1888.

anderen Resultat. Wurden aus einem einheitlichen<sup>1</sup> Eiskrystall Stäbe geschnitten, deren Längsrichtung senkrecht zur optischen Axe war, und so auf zwei Schneiden gelegt, dass die optische Axe vertical war, und dann belastet, so verhielt sich der Krystall so, als bestände er aus unendlich vielen sehr dünnen, nicht ausdehnbaren, aber vollkommen biegsamen Lagen, etwa wie Papier, zwischen dessen einzelnen Blättern eine klebrige Flüssigkeit sich befindet, so dass die einzelnen Blätter nur schwierig auf einander gleiten können. Die Lagen sind anfangs eben und senkrecht zur optischen Axe, werden sie durch das Gleiten gebogen, so bleibt die optische Axe doch in jedem Punkte senkrecht zur gebogenen Oberfläche. Legte man den Stab anfangs mit horizontaler optischer Axe auf die Schneiden, so ging keinerlei Bewegung vor sich, wohl aber, bei derselben Belastung, nach dem Kippen des Stäbchens um 90°. Der Grad der Krümmung war sehr unregelmässig, nahm aber mit der Zeit, welche das Gewicht wirkte, zu; wurden Zuschläge zum Gewicht gemacht, so wuchs die Krümmung stärker als das Gewicht, aber weniger als das Quadrat desselben. Der Einfluss der Temperatur wurde durch die übrigen Schwankungen im Allgemeinen verdeckt, er soll aber beträchtlich sein, indem die Durchbiegung bei —2° in einem Falle 2 bis 3 Mal so gross war als bei —10° unter sonst gleichen Umständen.

Nach diesen Versuchen verhält sich das Eis demnach ganz ähnlich wie das trikline Salz  $\text{KMnCl}_3 \cdot 2 \text{aq}^2$  bei der Deformation  $\alpha$  und  $\beta$ , d. h., es findet während der Biegung der Eisstäbe jene Bewegung statt, welche zuerst aus dem monoklinen Salz  $\text{BaBr}_2 \cdot 2 \text{aq}^3$  beobachtet (Deformation  $\gamma$ ) und als parallele Translation bezeichnet wurde; am Eis wäre OP (0001) die Translationsfläche. Da McCONNEL über seinen Experimenten gestorben ist, beschloss ich, sie wieder aufzunehmen und namentlich auch den Versuch zu machen, am Eis die reine Translation, ohne Biegung, wie am Brombaryum

<sup>1</sup> Gemeint sind wohl nur optisch homogene Eismassen, wenigstens ist nicht angegeben, wie die Einheitlichkeit sonst nachgewiesen ist.

<sup>2</sup> O. MÜGGE, dies. Jahrb. 1892. II. 95 u. 98.

<sup>3</sup> O. MÜGGE, dies. Jahrb. 1889. I. 145.

hervorzubringen und wo möglich auch die Translationsrichtung zu bestimmen.

Es wurden zunächst, auch um das Material, seine Bearbeitung, Festigkeit u. s. w. kennen zu lernen, die Versuche von Mc CONNELL wiederholt. Aus Eistafeln von 4—25 mm Dicke, gewonnen in einer in die Erde gegrabenen Wanne, wurden mittelst Säge Stäbchen geschnitten und auf einer etwas erwärmten Metallplatte geglättet<sup>1</sup>. Da auf lange anhaltenden Frost nicht gerechnet werden konnte, wurden die auf zwei Holzleisten gelegten Stäbchen von Anfang an möglichst hoch belastet, um die Versuche so viel wie möglich abzukürzen. Der Abstand der als Schneiden dienenden Holzleisten betrug 6—20 cm, die in der Mitte (mittelst Schnur) angebrachte Belastung bis zu 5 kg.

Das Ergebniss war eine vollständige Bestätigung der Beobachtungen Mc CONNELL'S. Optisch homogen befundene Stäbchen<sup>2</sup> bogen sich bei Belastung bis zur Grenze der Tragfähigkeit dann durch, wenn die optische Axe vertical war, also der Druckrichtung parallel lag, nicht, wenn diese horizontal lag. Es findet dabei eine wirkliche Krümmung der einzelnen OP (0001) parallelen Lagen statt, denn der Abstand der Endflächen des Stabes verringert sich und die optische Axe steht auch nach der Biegung senkrecht zur gebogenen Fläche OP (0001); auf den Seitenflächen, welche eben bleiben, verläuft die Auslöschung parallel zur Tangente an die gekrümmte Kante, so dass an sehr stark gekrümmten Stellen wie in dem Fig. 4 abgebildeten Stab bei  $k$  zwischen gekreuzten Nicols ein Theil des schwarzen stehenden Kreuzes erscheint. Die Durchbiegung ist eine dauernde, unelastische, optische Spannungen und Sprünge machten sich nicht bemerklich, die Stäbe blieben ganz klar.

In Fig. 1, 2 u. 4 sind die Umrisslinien einiger gebogenen Stäbe wiedergegeben.

<sup>1</sup> Damit optisch einheitliche Tafeln entstehen, darf es während des Gefrierens nicht schneien; vergl. unten p. 225.

<sup>2</sup> Zur optischen Untersuchung diente eine Turmalinzange und ein NÖRREMBERG'Scher Polarisationsapparat, für die Untersuchung im parallelen Licht wurden aus letzterem sämtliche Linsen entfernt.

Fig. 1. Dimensionen (Länge, Breite, Höhe senkrecht zu OP, P in cm) 12,3 : 1,5 : 0,35. Abstand der Schneiden (a) = 8 cm ca. Belastung 1 kg. Dauer der Belastung  $3\frac{1}{2}$  Stunden.  $t = -1\frac{1}{2}$  bis  $-2^\circ$ .

Fig. 2. 12 : 2 : 2; a = 8 cm. Belastung 5 kg. Starke Durchbiegung bereits nach 6 Stunden; nach weiteren 18 Stunden wurde

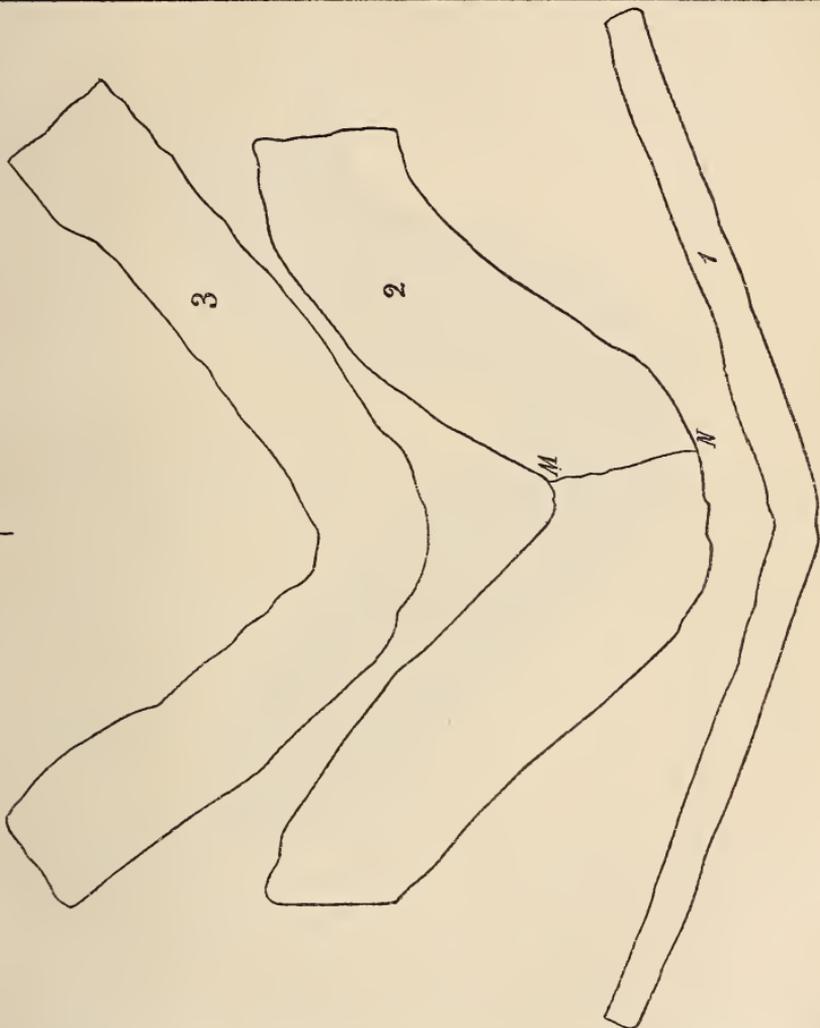
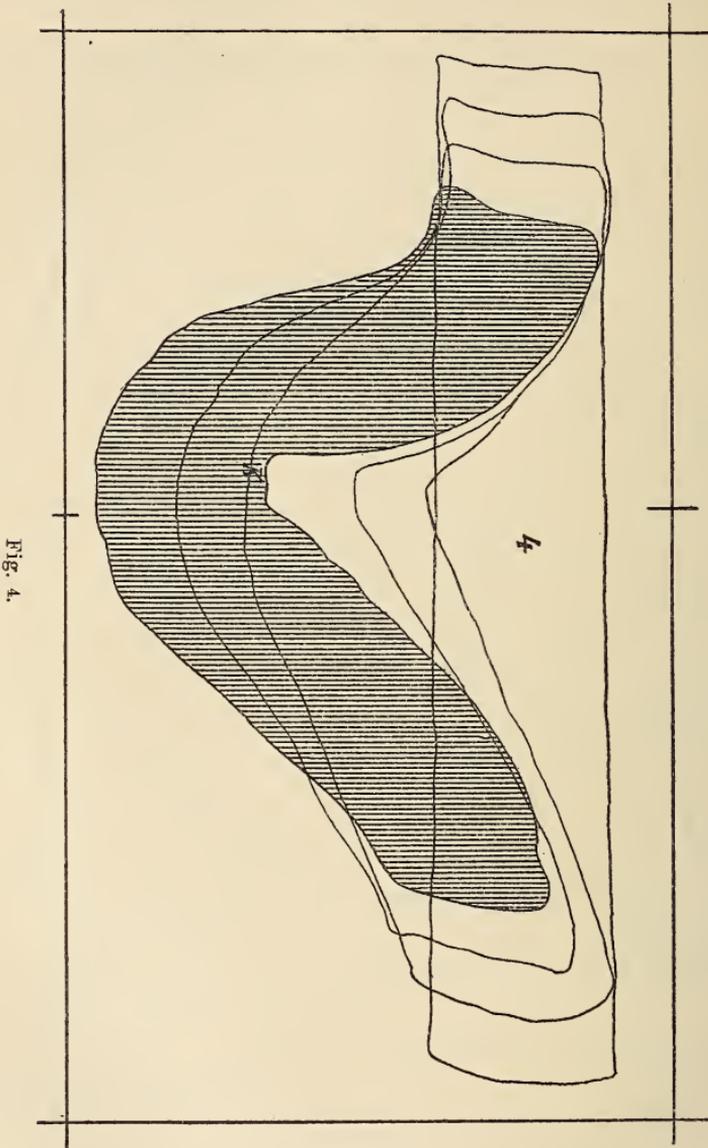


Fig. 1-3.

der Stab längs der Linie MN gebrochen vorgefunden.  $t = -2^\circ$  bis  $-3^\circ$ . (Der Stab war vorher bereits 18 Stunden ebenso stark, aber mit OP (0001) vertical belastet, ohne dass merkliche Durchbiegung erfolgt wäre, obwohl die Temperatur sehr hoch war, nämlich zwischen 0 und  $-1^\circ$ .)

Fig. 4. 20 : 2,3 : 1,9.  $a = 15,5$ . Der Stab wurde zunächst mit OP (0001) vertical 48 Stunden mit 2 kg bei  $-5^\circ$  bis  $-2,5^\circ$ , dann noch 24 Stunden mit 5 kg bei  $-2^\circ$  belastet, beides ohne Erfolg. Es wurde dann OP (0001) horizontal gelegt, wobei leider ein Stück



abbrach, so dass der Stab nur noch 12 cm lang blieb, und wieder mit 5 kg belastet. Obwohl jetzt der Abstand der Schneiden nur noch 10 cm betrug (und später wegen der Durchbiegung noch erheblich vermindert werden musste), war doch nach 3 Stunden bereits eine merkliche Senkung der Mitte eingetreten. Nach 23 Stunden

war die Durchbiegung wie gezeichnet (erste Curve,  $t = -1^\circ$  bis  $-1\frac{1}{2}^\circ$ ), nach weiteren 6 Stunden war die Krümmung bis zur zweiten Curve vorgeschritten ( $t = -2^\circ$ ), nach weiteren 16 Stunden hatte der Stab den schraffirten Umriss ( $t = -\frac{1}{2}^\circ$ ). Der Versuch wurde dann durch Thauwetter beendet.

Da die Biegung mit Translation verbunden ist, und durch diese erst möglich wird, bleiben die durch Luft einschüsse markirten Linien senkrecht zur Translationsfläche, nicht, wie Mc CONNELL<sup>1</sup> angiebt, vertical und unter einander parallel; es gilt dies vielmehr nur annähernd für schwache Krümmungen. Bei starken Krümmungen können sehr erhebliche Abweichungen

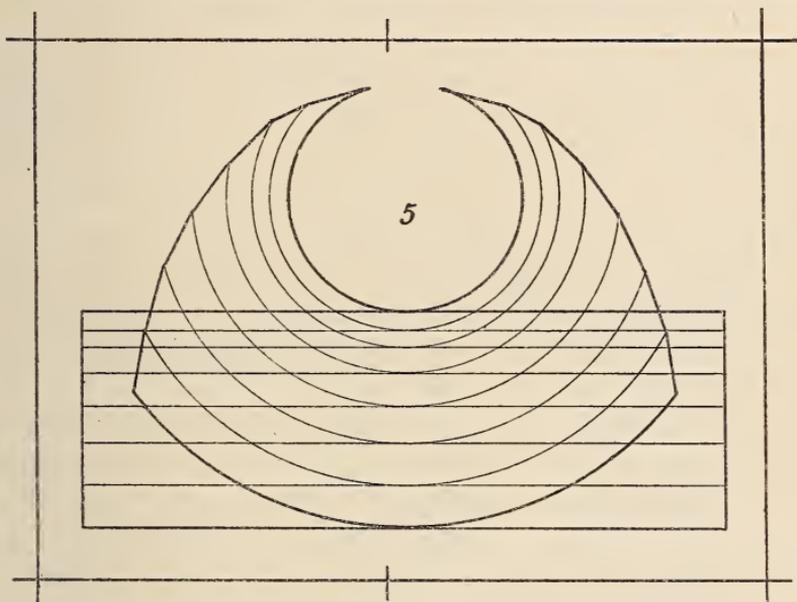


Fig. 5.

vorkommen, wie Fig. 5 veranschaulicht. Die hier gezeichnete Convergenz der Endflächen des gekrümmten Stabes konnte allerdings am Eis wegen der schwächeren Krümmung und starken Verdunstung nicht wahrgenommen werden, ebenso wenig gelang es wegen des letzteren Umstandes, die Streifung parallel der Translationsfläche, die auf den Endflächen wie bei Kaliummanganchlorür auftreten muss, zu beobachten; indessen zeigen Bruchflächen, zumal gebogener Eisstäbe, fast stets eine feine Streifung parallel OP (0001) (Taf. IV Fig. 1, Photogr. nach Abdruck in Glaserkitt). Stellt man durch Zer-

<sup>1</sup> Proc. Roy. Soc. 48. 259.

schlagen der Stäbe mittelst Meissel muschlige Bruchflächen ungefähr senkrecht zur Basis her, so tritt diese Translationsstreifung so constant auf, dass man sich danach über die Lage von OP (0001) orientiren kann; sie fehlt auf den muschligen Bruch(Spalt?)-flächen parallel zur Basis.

Aus derselben (nach der Basis tafelförmigen) Eisplatte nach verschiedenen Richtungen, aber von möglichst benachbarten Stellen geschnittene Stäbe zeigten hinsichtlich der Leichtigkeit der Durchbiegung keine merklichen Unterschiede. Dass die Stäbe sich durch Umlegen wieder gerade biegen lassen, wurde schon von KOCH (l. c.) beobachtet.

Um Translationen ohne Biegung zu bewirken, wurden aus einer etwa 8 cm dicken Eisplatte etwa 1 cm dicke Stäbe von quadratischem Querschnitt senkrecht zur Oberfläche geschnitten. Ein solcher Stab ist auch schon von Mc CONNELL untersucht, indessen mit wenig befriedigendem Erfolg. Er berichtet darüber in seiner letzten Arbeit (p. 325): Wenn die optische Axe longitudinal lag, bog sich der Stab ebenfalls, aber nicht sehr schnell, und „the general behaviour was more obscure. Still, this case, too, was in satisfactory agreement with the analogy mentioned above (nämlich dem Aufbau aus Blättern parallel OP). Der p. 329 abgebildete, aus zwei Theilen mit nicht parallelen optischen Axen bestehende Stab (während dessen „Biegung“ die Temperatur über 0° gestiegen war), ist aber offenbar schon zu Anfang optisch nicht homogen gewesen, denn die Erklärung Mc CONNELL's, dass die beiden Krystalle virtuell in dem Stabe schon zu Anfang vorhanden, ihre optischen Axen aber so nahezu parallel waren, dass sie sich im Polariskop wie ein Krystall verhielten, kann nicht befriedigen, da blosse Translationen gerade dadurch ausgezeichnet sind, dass sie keinerlei physikalische Änderungen im Krystall nach sich ziehen. Auch ein Vergleich mit der Biegung der Eiskrystalle bei den oben beschriebenen Versuchen, wie ihn Mc CONNELL anstellt, scheint nicht statthaft, da es sich hier nur um scheinbare Biegung, nämlich Rundung der Oberfläche, handeln kann. Es schienen daher neue Versuche wünschenswerth.

Dazu wurden nur optisch völlig homogen befundene Stäbchen parallel zur optischen Axe verwendet, da sich zeigte,

dass auch geringe Inhomogenitäten schon erhebliche Störungen bewirkten. Um möglichst starke Belastungen anwenden zu können, wurden die als Schneiden dienenden Holzleisten einander sehr genähert, anfangs auf etwa 2 cm, später bis auf  $\frac{1}{2}$  cm; Stäbe von 1 qcm Querschnitt vertragen dann noch eine Belastung bis über 5 kg.

Es zeigte sich, dass zwischen den Schneiden ein Stück des Eises, etwa von der Breite der Gewichtsschnur, sich nach und nach aus dem Stabe vorschieben und sogar ganz herausdrängen lässt.

Fig. 6 giebt einen etwas schematischen Längsschnitt durch einen etwa 2 Stunden belasteten Stab, Fig. 7 durch einen solchen kurz vor der völligen Trennung. Die herausgedräng-

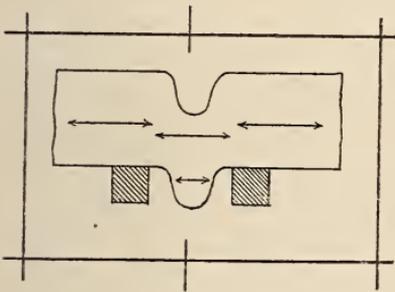


Fig. 6.

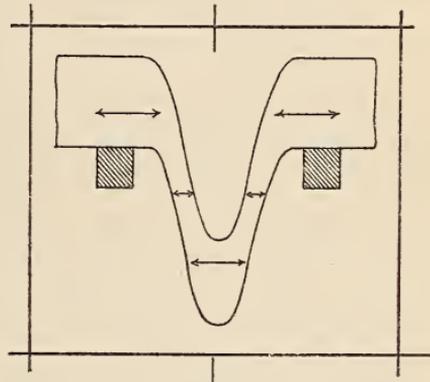


Fig. 7.

ten Theile sind öfter ihrem ganzen Umfange nach parallel zur Basis gestreift, verhalten sich aber optisch ganz wie der Haupttheil, d. h. die Elasticitätsaxe  $c$  liegt überall parallel der Pfeilrichtung.

Von optischen Anomalien durch Spannung und von Sprüngen ist nichts zu bemerken, die Stäbe bleiben auch vollkommen klar.

Die Photographieen Taf. IV Fig. 2—5 zeigen derartige Stäbe, in welchen die scheinbare Biegung durch die parallel zur optischen Axe gestreckten Luftpinschlüsse noch besonders gut hervortritt, in etwa zweifacher Vergrößerung<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Störend sind leider Eiskristallisationen und (z. Th. ebenfalls linienförmige) Luftpinschlüsse zwischen den Eisstäben und der als Hintergrund benutzten matten Glastafel, auf der man sie hatte festfrieren lassen.

Fig. 2. Stab von 1 qcm Querschnitt, mit 5 kg etwa 2 Stunden belastet.

Fig. 3. Es hat in Folge Senkung der einen Tragleiste fast Abschiebung längs OP (0001) stattgefunden.

Fig. 4. Ebenfalls in Folge Senkung der einen Tragleiste hat auch wirkliche Biegung stattgefunden, und zwar um etwa  $25^\circ$ . Die Grenze der beiden Theile verläuft durch die dünnste Stelle des Stabes; rechts und links davon löscht jeder Theil völlig homogen aus.

Fig. 5. Aus dem Stab war das untere Stück ganz herausgedrängt, es fand sich (wie öfter) festgefroren an der Gewichtsschnur; es trug rechts noch einen langen schmalen Zapfen, entsprechend dem auf der linken Seite an den Theil des Stabes links angewachsenen; dieser ist leider abgebrochen, aber durch den breiten Strich angedeutet. Er setzte sich an den kleinen zapfenförmigen Vorsprung des Stabtheiles rechts an. Die Umrisse haben beim Befestigen auf der matten Glastafel etwas gelitten. Wo an dem Theil links sich die schmale Lamelle ansetzt, hat nach der optischen Untersuchung auch Biegung des ersteren um etwa  $20^\circ$  stattgefunden.

Die abgebildeten und eine Reihe anderer Stäbe sind alle aus derselben Platte von möglichst benachbarten Stellen (etwa innerhalb eines Quadratdecimeters) entnommen, indessen war nicht festzustellen, ob sie (abgesehen von der parallelen Lage der optischen Axen) auch sonst krystallographisch einheitlich waren<sup>1</sup>, man konnte daher nicht erkennen, nach welchen Richtungen die Translation erfolgte. Indessen wird aus dem gleichen Verhalten aller Stäbchen, gleichgültig, ob die eine oder andere ihrer Seitenflächen vertical gestellt war, schon wahrscheinlich, dass das Eis Translationen nach allen Richtungen in OP (0001), wenn auch mit verschiedener Leichtigkeit, einzugehen vermag.

Um darüber noch näheren Aufschluss zu erhalten, wurde ein und derselbe, parallel der optischen Axe geschnittene Stab an einer Stelle parallel der einen Seite, an einer anderen parallel der anderen Seite, dann an zwei weiteren Stellen

<sup>1</sup> Es wurde versucht, die deformirten Stäbe in frierendem Wasser weiter wachsen zu lassen, indessen schienen sie sich, nach der Richtung der anschliessenden Eisnadeln zu urtheilen, diesen gegenüber wie fremde Körper zu verhalten. Auf die Oberfläche der benutzten Eistafel gebrachtes Wasser fror mit dieser zu einer scheinbar einheitlichen Masse zusammen, ohne krystallographische Umrisse zu verrathen. Auch Versuche, Ätzfiguren durch Wasser oder Salzlösungen oder deutliche TYNDALL'sche Schmelzfiguren zu erhalten, waren nicht von Erfolg.

auch noch parallel den beiden Diagonalen seines quadratischen Querschnittes belastet. Nach allen vier Richtungen trat Translation, und zwar mit nicht merklich verschiedener Leichtigkeit ein.

Taf. IV Fig. 6 zeigt einen solchen Stab von der einen Seite, Fig. 7 von der anderen (etwas vergrössert), Fig. 8 (etwas verkleinert) von der Diagonale seines Querschnittes aus gesehen. Der nach den beiden Diagonalen translatirte Theil desselben Stabes ist leider abgebrochen.

Die verschobenen Theile lassen sich nach Umlegen des Stäbchens wieder zurückschieben, wenn nicht gleichzeitig Biegung eingetreten ist.

Die Temperatur schwankte bei diesen Versuchen zwischen  $-3^{\circ}$  und  $-16^{\circ}$ ; besonders leichte Verschiebbarkeit bei höherer Temperatur wurde nicht bemerkt; indessen kann ein nicht sehr starker Einfluss der Temperatur leicht durch kleine Ungleichheiten in den Dimensionen der Stäbchen und verschieden leichte Translationsfähigkeit nach verschiedenen Richtungen verdeckt worden sein.

Es scheint, dass die Translation erst beginnt, wenn das Gewicht eine gewisse Grösse erreicht hat. So war z. B. ein Stab 24 Stunden mit 5 kg belastet, ohne die mindeste Deformation zu zeigen; diese trat aber (bei nahezu derselben Temperatur und derselben Lage) sehr schnell ein, als das Gewicht auf 7 kg erhöht wurde.

Obwohl sich später beim Aufthauen herausstellte, dass die benutzte Eisplatte aus sehr unregelmässig sich abgrenzenden stengeligen Individuen etwa senkrecht zu OP (0001) von nur 1—2 qcm Querschnitt bestand und also kaum einer der verwendeten Stäbe krystallographisch homogen gewesen sein dürfte, geht aus den Beobachtungen doch wohl mit Sicherheit hervor, dass das Eis Translationen nach allen Richtungen in der Basis einzugehen vermag. Dagegen muss es weiteren Versuchsreihen vorbehalten bleiben zu ermitteln, nach welchen Richtungen sie am leichtesten stattfinden. Nach den nicht merklichen Unterschieden der Härte innerhalb der Basis und dem Fehlen ausgezeichneter faseriger Bruchflächen ist allerdings zu vermuthen, dass die Translationsfähigkeit nach verschiedenen Richtungen nicht sehr verschieden ist.

Den zuletzt beschriebenen äusserlich ähnliche Verschiebungen und selbst vollkommene Trennungen durch Abscheerung erhielt schon MOSELEY 1870<sup>1</sup>. Er steckte durch zwei genau auf einander passende durchbohrte Bretter einen Eiscylinder von  $1\frac{1}{2}$  Zoll Durchmesser und brachte die vertical gestellten Bretter auf einander zum Gleiten, indem das eine erheblich (mit etwa 4,4 kg auf den Quadratcentimeter des Cylinderquerschnitts) belastet, das andere festgehalten wurde. Es trat Verschiebung im Eis längs der Grenzfläche der beiden Bretter ein und die nach etwa  $\frac{1}{2}$  stündiger Belastung erhaltenen Abscheerungsflächen lagen senkrecht zur Cylinderaxe. (Wurde die Belastung noch etwas erhöht, so trat die Abscheerung sofort ein.) Die krystallographische Orientirung des Cylinders ist nicht angegeben, es wird nur gesagt, dass einige aus compactem Eis geschnitten, die anderen durch Zusammenpressen von Eisstücken in cylindrischen Formen erhalten wurden; letztere waren also jedenfalls auch optisch inhomogen. Auch bei dem Versuche, Eiscylinder zu zerquetschen, beobachtete MOSELEY schräg zur Axe liegende ebene Trennungsflächen mit ein wenig wulstigen Rändern. Die Temperatur bei diesen Versuchen betrug  $21-24^{\circ}$  (ca.)! Optische Untersuchungen der verschobenen Theile hat MOSELEY nicht vorgenommen.

Mit Rücksicht auf die vorstehenden Angaben, nach denen es scheinen könnte, als ob das Eis Translationen nach jeder beliebigen Fläche und Richtung eingehen könnte, sind noch eine Reihe von // OP (0001) geschnittenen Stäben daraufhin untersucht. Diese hatten nur 1 bis  $\frac{1}{2}$  qcm Querschnitt, wurden aber trotzdem wie früher bei grosser Annäherung der Schneiden mit 5 kg belastet; OP (0001) wurde bald horizontal, bald vertical gestellt.

Keines dieser Stäbchen zeigte bei einer zwischen  $+1^{\circ}$  und  $-10^{\circ}$  liegenden Temperatur selbst nach z. Th. mehr als 48stündiger Belastung ähnliche Erscheinungen wie die parallel zur optischen Axe geschnittenen. Einige bogen sich allerdings, als OP (0001) horizontal lag, ein wenig durch, so wie die anfangs untersuchten längeren Stäbchen der Art. Bei

<sup>1</sup> Philos. Mag. (4.) 39. I. 6—8.

höherer Belastung brachen die Stäbe. Es scheint somit nach den Versuchen, bei denen OP (0001) horizontal lag, nicht möglich, Translationen parallel zur optischen Axe zu bewirken; ebenso geht aus denen, bei welchen OP (0001) vertical lag, hervor, dass Translation // OP (0001) nicht eintritt, wenn die Lagen // OP (0001) quer zu den Schneiden liegen. In beiden Fällen kommt eben nicht allein die Cohäsion und Beweglichkeit je zweier benachbarter Lagen // OP (0001) in Frage, sondern auch die Festigkeit jeder einzelnen Lage, es müsste ein Zerreißen derselben stattfinden.

Die Plasticität der Eiskrystalle äussert sich noch in einer anderen Weise, die allerdings ebenfalls durch das Translationsvermögen bedingt erscheint. Legt man einen senkrecht zur optischen Axe geschnittenen Stab so auf zwei Schneiden, dass die optische Axe etwa  $45^{\circ}$  mit der Verticalen bildet und belastet ihn, indem man gleichzeitig, etwa durch Einkerbungen der Schneiden, Sorge trägt, dass er in den Unterstützungspunkten sich nicht um seine Längsrichtung drehen kann, so drehen sich trotzdem die übrigen Theile des Stabes zwischen den Schneiden, am stärksten im mittleren Querschnitt, und zwar derart, dass die optische Axe nach einiger Zeit einen kleineren Winkel als zu Anfang mit der Verticalen bildet. Der Stab wird also dabei um eine Richtung senkrecht zur optischen Axe gedreht (und gleichzeitig durchgebogen), wie das auch schon aus einem Versuche Mc CONNELL's hervorzugehen scheint<sup>1</sup>.

Die Torsionsaxe und Translationsrichtung sind bei diesem Versuch am Eis parallel; ebenso ist es, wie ich mich überzeugt habe, am Brombaryum, Kaliummanganchlorür, Gyps, Antimonglanz und Vivianit. Am Eis war es nicht mehr möglich, diese Erscheinung weiter zu verfolgen, indessen ist, wie bei den anderen genannten Substanzen, anzunehmen, dass diese (nicht mit Spannung verbundene, unelastische) Torsion auch beim Eis dadurch möglich wird, dass die nach derselben Richtung senkrecht zur optischen Axe sich erstreckenden Molecülreihen sich verhalten wie nicht ausdehnbare, aber vollkom-

---

<sup>1</sup> Proc. Roy. Soc. 49. 336. Experiment 14.

men und beliebig biegsame Fäden, welche unabhängig von einander parallel ihrer Längsrichtung gleiten können, ohne dabei ihren Abstand im mindesten zu ändern.

Die Translationsfähigkeit des Eises, zusammen mit der dadurch möglichen Biegsamkeit und Drillbarkeit würden offenbar vollständig genügen, die Bewegung der Gletscher zu erklären, wenn es durch besondere Versuchsreihen gelänge, den Nachweis zu führen, dass die Translationsfähigkeit mit der Temperatur merklich zunimmt. Daneben noch Schmelzung durch Druck anzunehmen, scheint zwar nicht mehr nöthig, sie mag aber gleichwohl stattfinden, und ihre Annahme ist vielleicht zur Erklärung des Grösserwerdens des Gletscherkorns vom Firn bis zum Gletscherende nicht zu ungehen.

Nach den letzten Angaben von HAGENBACH-BISCHOFF<sup>1</sup> sind die Gletscherkörner, wie aus der Orientirung der TYNDALL'schen Schmelzfiguren hervorgeht, in keiner Weise gegenüber der Schwerkraft oder der Bewegungsrichtung oder gegenüber dem Druck im Innern des Gletschers orientirt. Eine parallele Lage der optischen Axen in benachbarten Körnern, wie sie HAGENBACH-BISCHOFF früher mehrfach beobachtete<sup>2</sup> und wie sie noch früher auch BERTIN<sup>3</sup> und GRAD und DUPRÉ<sup>4</sup> an manchen Stellen fanden, ist aber nicht unwahrscheinlich. Es müssten in Folge der Translationsfähigkeit und gleichzeitiger Biegung schliesslich die optischen Axen parallel zur Druckrichtung werden. Damit stimmt insbesondere die Angabe von GRAD und DUPRÉ, dass am Ende des Aletsch-Gletschers, wo sein Bett ziemlich stark geneigt war, die das Interferenzbild zeigenden Platten nicht horizontal, sondern etwas geneigt aus dem Gletschereis geschnitten werden mussten, denn es ist klar, dass in Folge der Translation und Biegung sich die Basis jedes Individuums möglichst dem Untergrund anschmiegen musste. Dabei können die Angaben von J. MÜLLER<sup>5</sup> und

<sup>1</sup> Beiblätter zu WIEDEMANN's Ann. 14. 895. 1890.

<sup>2</sup> Zeitschr. f. Kryst. 11. 110 u. 20. 309. (Referat.)

<sup>3</sup> Compt. rend. 63. 346. 1866. II. u. Ann. Chim. et Phys. (5.) 13. 283. 1878.

<sup>4</sup> Compt. rend. 69. 955. 1869. II.

<sup>5</sup> Pogg. Ann. 147. 624. 1872.

KLOCKE<sup>1</sup> und die neueren von HAGENBACH-BISCHOFF, welche keine parallele optische Orientirung der Gletscherkörner fanden, sehr wohl zu Recht bestehen.

Auch das Klarerwerden des Gletschereises nach dem Ende des Gletschers hin in Folge von Ausstossung der Luftbläschen mag wohl durch die Translationsfähigkeit gefördert werden, da diese eine stetige Änderung der Oberflächenform der Individuen gestattet und dabei etwa an die Oberfläche der Individuen gelangende Bläschen natürlich nicht wieder aufgenommen werden. — Ob die an den Gletscherkörnern beobachtete Streifung, die nach HAGENBACH-BISCHOFF<sup>2</sup> parallel zur Basis verläuft, mit der Translationsstreifung identisch ist, vermag ich nicht zu sagen.

Eis von regellos körniger Structur, also in etwas von der Art des Gletschereises, erhält man, wie schon KLOCKE<sup>3</sup> fand, wenn es während des Gefrierens schneit. Die Eisdecke entsteht dann aus den regellos im Wasser schwimmenden Schneekryställchen durch Weiterwachsen, und zwar ungefähr senkrecht zur Oberfläche. Die Individuen sind daher regellos orientirt, ihre Längsrichtungen (welche keineswegs der optischen Axe parallel liegen) sind ungefähr senkrecht zur Wasseroberfläche. Stäbe aus solchem, ebenfalls völlig klarem Eis geschnitten, sind zwar merklich mürber als die aus optisch einheitlichem Eis, verhalten sich aber beim Biegen nicht merklich anders als jene oben beschriebenen, bei welchen OP (0001) horizontal lag; sie biegen sich bald durch und zwar recht regelmässig, wenn die Individuen nicht zu gross sind (vergl. Fig. 3 p. 215) (ihr Durchmesser betrug hier etwa 1—4 mm). Dünne Platten, parallel der Verticalebene aus solchen gebogenen Stäbchen geschmolzen, zeigen undulös auslöschende Körner nicht merklich mehr als solche aus den ungebogenen Stäbchen. Es werden zwar neben Translationen auch hier Biegungen stattgefunden haben, sie werden indessen bei der Kleinheit des Kornes gegenüber dem Gesamtbetrag der Biegung für das einzelne Korn sehr gering sein können. Das wird auch für die Gletscherkörner zumeist zu-

<sup>1</sup> Dies. Jahrb. 1881. I. 26.

<sup>2</sup> Zeitschr. f. Kryst. 11. 111.

<sup>3</sup> Dies. Jahrb. 1879. 279.

treffen, und das wird der Grund sein, dass starke Krümmungen der Auslöschungsrichtung bei ihnen bisher anscheinend nicht beobachtet sind (abgesehen von Stellen mit anomaler Doppelbrechung). Enthält ein optisch wesentlich homogener Eisstab ein kleineres optisch abweichendes Stück, so macht sich dies bei der Biegung sehr bald bemerklich, es hebt sich mit stumpfen Ecken und Kanten aus der anfänglich ebenen Oberfläche des Stabes heraus. (Derartige Unebenheiten entstehen z. B. auf Stäben, welche aus Stalaktiten parallel ihrer Längsrichtung ausgeschmolzen sind, weil sie aus grösseren Individuen als das Schneeeis zusammengesetzt sind.) Das grössere Individuum hat also, wenn man so sagen darf, das Bestreben, kleinere ihm fremde Theile bei der Translation und Biegung herauszudrängen. Sollte auch darauf **z. Th.** das Grösserwerden des Gletscherkornes vom Firn bis zum Glétscherende beruhen?

Das auf ruhig stehendem Wasser sich bildende Eis pflegt bekanntlich einheitlich mit der optischen Axe senkrecht zur Wasseroberfläche orientirt zu sein, ist aber im Übrigen, wie aus der Orientirung der TYNDALL'schen Schmelzfiguren und dem Zerfall beim Aufthauen folgt, aus zahlreichen Individuen mit nicht parallelen Nebenaxen zusammengesetzt, was man auch direct während des Gefrierens erkennen kann. Tafeliges Wachstum nach der Basis, wie es ja auch die Schneesterne zeigen, vorausgesetzt, erscheint die horizontale Lage der Basis des frei schwimmend sich bildenden Eises als einfache Folge des hydrostatischen Druckes<sup>1</sup>.

Neben diesem Eis bilden sich aber, wie bekannt, zu Anfang des Gefrierens noch lange, dünne Nadeln, die eben-

<sup>1</sup> BERTIN (Ann. Chim. et Phys. (5.) 13. 283. 1878) nimmt an, dass das Eis, ruhiges Wachstum vorausgesetzt, sich stets mit der optischen Axe normal zur Abkühlungsfläche orientire und stützt sich dabei auf die Orientirung der optischen Axen in Eis, das durch Abkühlung an einer 45° und einer 90° zur horizontalen geneigten Wand gebildet war, senkrecht zu diesen. Abgesehen davon, dass die angegebene Orientirung nur in der Mitte der abkühlenden Flächen beobachtet wurde, ist nicht einzusehen, welcher Art der Zusammenhang zwischen der Orientirung der Krystalle und der Abkühlungsfläche sein könnte, zumal angesichts der Strömungen in dem sich abkühlenden Wasser.

falls parallel der Wasseroberfläche liegen, aber, wie wohl zuerst KLOCKE<sup>1</sup> gezeigt hat, parallel ihrer Längsrichtung auslöschen. KLOCKE schloss daraus, dass sie nach der optischen Axe gestreckt seien; das ist aber nicht richtig, denn parallel ihrer Längsrichtung liegt  $a$ , nicht  $c$ , sie sind also gestreckt senkrecht zur optischen Axe, also wahrscheinlich wie die Strahlen der Schneesterne verlängert nach der Kante  $OR : mR^2$ . Nimmt man solche Eisnadeln während des Gefrierens aus dem Wasser, so findet man, dass sich, meist nur auf einer Seite, gezähnte und gefiederte Wachstumsformen angesetzt haben, und zwar sind diese tafelig nach der Basis. Beim weiteren Frieren sieht man auch zwischen diesen Eisnadeln regelmässig hexagonale Wachstumsformen ähnlich grossen Schneesternen auf der Wasseroberfläche sich ausbreiten; sie wachsen offenbar später allein weiter, denn man findet in der fertigen Eisdecke die langen Nadeln wie fremde Einschlüsse in dem sonst optisch homogenen Eise.

Für die Erklärung der Entstehung dieser Eisnadeln scheint mir zunächst beachtenswerth, dass sie fast stets von fremden Körpern oder vom Rande der Wasserfläche aus anschliessen, also von solchen Stellen, an welchen in Folge der Vergrösserung der Oberfläche die Abkühlung eine etwas schnellere und zugleich die Oberfläche durch die Oberflächenspannung nicht horizontal ist. Nach den sonstigen Erfahrungen ist anzunehmen, dass auch die in diesen kleinen gekrümmten Oberflächentheilen des Wassers sich bildenden Eiskryställchen tafelig nach  $OP$  (0001), etwa Schneestern-artig, entwickeln und bestrebt sind, ihre Tafelfläche parallel der Oberfläche zu legen. Wächst nun ein Strahl eines solchen Eissternes geradlinig weiter, so liegt er, in der freien, horizontalen Wasserfläche angelangt, nicht parallel der Oberfläche desselben, sondern darunter, er wird daher, wenn er dort in dem etwas wärmeren Wasser nicht abschmilzt, nach oben

<sup>1</sup> Dies. Jahrb. 1879. 275.

<sup>2</sup> Dass die Schneesterne höchstens eine rhomboëdrische, nicht holoëdrische, Symmetrie haben und ihre Seitenflächen  $mR$ , nicht  $mP2$ , entsprechen, ergibt sich auch mit Sicherheit aus einigen der von NORDENSKJÖLD abgebildeten Schneesterne. (Bull. soc. franç. de min. 16. 1893. z. B. Fig. 13, 14, 15, 17, 18, 20, 23, 24 u. a.)

gedrängt und also an der Stelle, wo die Wasserfläche horizontal wird, abgebrochen oder gebogen. Im ersten Fall wird die frei schwimmende Eisnadel zu einem normal orientirten Individuum auswachsen, findet aber Biegung statt, und zwar, wie anzunehmen ist, im Allgemeinen um die bevorzugte Biegungsrichtung; das ist diejenige in  $OP$  (0001) liegende, welche senkrecht zur leichtesten Translationsrichtung ist, so wird im Allgemeinen nicht gerade die optische Axe, sondern die Normale irgend eines Rhomboëders senkrecht zur Wasseroberfläche zu liegen kommen. (Fig. 8.  $SS$  ist die Schnittlinie der horizontalen und der nicht horizontalen (aber ebenfalls eben gedachten) Wasserfläche; die Strahlen des Eissternes sind

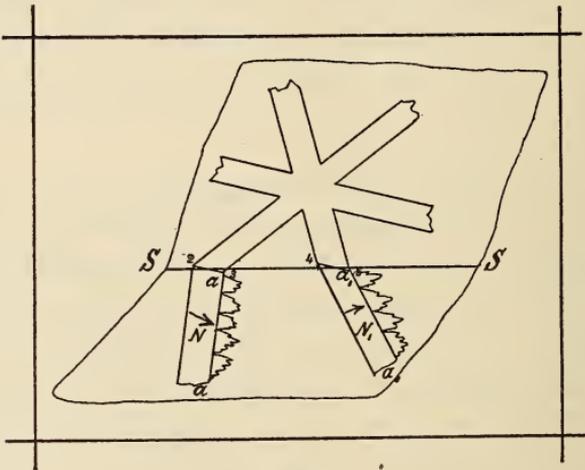


Fig. 8.

der deutlicheren Darstellung wegen sehr breit gezeichnet, die Richtung einer Nebenaxe 2—3 und 4—5 als leichteste Knickungsrichtung angenommen.) Die Fläche  $OP$  (0001) der Eisstrahlen  $N$  und  $N_1$  wird in der Pfeilrichtung nach unten zum Horizont geneigt sein, wenn nicht zufällig  $SS$  einer leichtesten Knickungsrichtung parallel läuft. An die Nadeln  $N$  und  $N_1$  werden sich auf der in das Wasser tauchenden Seite  $aa$  und  $a_1a_1$  die gezähnten und gefiederten Wachstumsformen tafelig nach  $OP$  (0001) ansetzen und bald durch den Auftrieb um die bevorzugte Biegungsrichtung  $aa$  und  $a_1a_1$  so weit gekrümmt werden, bis sie mit  $OP$  (0001) in der horizontalen Wasserfläche liegen.



5.



1.



8.



6.



7.



2.

4.

3.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geologie und Paläontologie](#)

Jahr/Year: 1895

Band/Volume: [1895\\_2](#)

Autor(en)/Author(s): Mügge Johannes Otto Conrad

Artikel/Article: [Ueber die Plasticität der Eiskristalle 211-228](#)