

Über die festen Aggregatzustände des Wassers

unter besonderer Berücksichtigung der Gletschertheorie.

Von

Rudolf Danneberg.

Nicht alle Eigenschaften der festen Aggregatzustände des Wassers sind es, welche den speziellen Zweig der physikalischen Geographie, die Gletscherphysik, interessieren, sondern nur die, welche zur Beantwortung der folgenden drei Fragen wesentlich sind: 1. Wie entsteht aus dem Schnee das Gletschereis; 2. warum bewegt sich der Gletscher; 3. welche Wirkung übt er auf sein Bett aus.

Während die erste Frage erst neuerdings von einigen Forschern gestreift worden ist, und dabei meist der Übergang von Firn zu Eis behandelt wird, sind die beiden letzten schon vor langer Zeit Streitobjekt gewesen. Da aber die beiden ersten im innigen Zusammenhange stehen, wie die Untersuchung ergeben wird, deren Anregung ich meinem hochverehrten Lehrer Herrn Professor Ratzel verdanke, so sollen sie vorläufig einer Besprechung unterzogen werden, während die dritte Frage einer besonderen Betrachtung vorbehalten wird, und zwar soll nicht der naturgemäße Gang, die Behandlung der Frage 1 vor 2, sondern der geschichtliche Gang der Entwicklung eingeschlagen werden.

I. Die Eigenschaften des Eises, die das Fließen des Gletschers erklären.

Die Frage, weshalb sich der Gletscher bewegt, war schon vor einem Jahrhundert Gegenstand eifriger Erörterung. Ihre Beantwortung wurde oft leidenschaftlich betrieben; so z. B. vor ungefähr 50 Jahren von J. Charpentier, P. Merian, Elie de Beaumont, Agassiz, Desor, Hopkins, Hugi, Schlagintweit u. a. 10 Jahre später loderten die Flammen von neuem auf. Tyndall regte die Diskussion an. Seinen Untersuchungen schlossen sich bedeutende Arbeiten an, wie z. B. solche von Helmholtz, Thomson, Ball, Moseley, Croll, Heim, Pfaff u. a. Die Verhandlungen klangen in einen ermüdenden Streit aus, ohne daß die wichtige Frage beantwortet worden wäre. Neuerdings erst erhebt sich die Frage wieder und giebt Anlaß zu neuen Untersuchungen. Allerdings faßt man jetzt das Problem von einer anderen Seite an, und bis heute ist man wohl kaum über die grundlegenden Betrachtungen hinausgekommen, so daß man jetzt noch in arger Verlegenheit wäre, wenn man entscheiden sollte, welche Theorie die wahre sei. Soll man es mit Forbes und Rendu für richtig halten, daß der Gletscher ein plastischer Körper ist, der sich den Krümmungen des Thales anschmiegt und nach den Gesetzen der halbflüssigen Körper sich den Abhang

hinunter wälzt? Oder ist es richtiger, sich der Ansicht eines Tyndall anzuschließen, der behauptet, Eis sei nicht plastisch im üblichen Sinne? Die geringe Plasticität, die es mit anderen Körpern gemein habe, genüge nicht zur Erklärung des Fließens. Das Zerbrechen, Auftauen und Wiedergefrieren bei Druckänderungen bedinge ein plastisches Verhalten des Eises bei Druck, obwohl es selbst im physikalischen Sinne sehr wenig plastisch sei. Diese Plasticität bei hohem Druck aber erkläre das Fließen des Gletschers vollständig. Oder sollen wir einer der vielen anderen Meinungen beipflichten?

Es wäre wohl heute verfrüht, einer dieser Theorien die Palme zu reichen. Wie jetzt die Dinge liegen, scheint es wahrscheinlich, daß den Sieg nicht eine Theorie allein davontragen wird. Der Widerstreit in den Bewegungstheorien der Gletscher hat aber seinen guten Grund. Es ist nämlich auf keinem Gebiete so phantasievoll und damit für eine exakte Wissenschaft, wie es die Geophysik sein soll, so leichtsinnig mit Hypothesen umgegangen worden, als auf dem vorliegenden Bereiche, das sehr wohl exakten Messungen zugänglich ist. Wenn es die Aufgabe einer Hypothese sein soll, die Erfahrung zu einem widerspruchslosen Ganzen zu vereinigen, so hat gerade die Gletschertheorie der früheren Zeiten durch die Hypothesen den Zusammenhang der Erscheinungen mehr auseinander gerissen und nicht selten erst Widersprüche in die Erfahrung hineingetragen.

So sehr Anticipationshypothesen — solche konnten die Hypothesen der früheren Zeit natürlich allein sein nach dem oben Gesagten — für wissenschaftliche Forschung notwendig sind, ja, so sicher es ist, daß ohne sie ein Fortschritt der Wissenschaft nur sehr langsam vor sich gehen könnte, so sind sie denn doch nur erlaubt, so lange die aus den Hypothesen nach den Naturgesetzen gefolgerten Erscheinungen mit der Erfahrung im Einklang stehen. Mit „einer“ Thatsache, die mit diesen gefolgerten Erscheinungen nicht übereinstimmt, fällt die ganze Hypothese als allgemeinstes Erklärungsprinzip.

Das schließt aber nicht aus, daß sie mit einer oder gar einigen anderen Hypothesen zusammen die vollständige Erklärung der Erscheinung geben kann, was bei einem so verwickelten Phänomene wie dem der Gletscherbewegung wohl zu vermuten ist. Nicht selten aber vergaß man gerade dies im Eifer für spezielle Hypothesen.

Meistens verfuhr man so: Ein einzelner Faktor des verwickelten Vorgangs wurde herausgegriffen und zum Ausgangspunkt einer Hypothese gemacht, die nun alles erklären sollte, daher übertrieben wurde — so weit übertrieben wurde, daß andere ebenso wichtige Faktoren übersehen oder unterschätzt wurden.

Dabei stehen — wie natürlich — die herausgegriffenen Faktoren unter dem Zeichen der wissenschaftlichen Strömung ihrer Zeit, indem man z. B. einzelne specielle physikalische Forschungen über Eis, die exakt nachgewiesen wurden, zum Ausgangspunkt nahm. Es sei nur an die Regelation des Eises, an die ersten Versuche über Eisplasticität, an die Verwertung der Forschungen der theoretischen Physik über zähe Flüssigkeiten erinnert.

Unter diese allgemeine Kritik fallen alle Dilatationstheorien, wie sie um die Wende des 18. Jahrhunderts von Toussaint und Johann von Charpentier, Bixelx, anfangs auch von Agassiz (Etudes sur les glaciers 1842) aufgestellt wurden, nachdem den Gedanken der Dilatation schon Jak. Scheuchzer 1705 ausgesprochen hatte. Sie gehören zu den Theorien, die bald zu Widersprüchen mit der Erfahrung führten und deshalb ganz weichen mußten, heute auch thatsächlich verlassen sind.

Ganz dasselbe läßt sich von einer Theorie behaupten, die Canon Moseley im Phil. Mag. 1862 und 1869 aufgestellt hat, und die von W. R. Browne in den Proc. of Roy. Soc. 1882 verteidigt wurde.

Moseley sucht dem Problem auf mathematischem Wege beizukommen, nachdem er seine erste Theorie vom Jahre 1862 und August 1869 aufgegeben hat. Dadurch aber wird er gezwungen, das Problem unter großen Voraussetzungen und Vereinfachungen zu behandeln, so daß seine Theorie keine Bewegungstheorie der Gletscher, sondern lediglich eine formale Folge dessen ist, was er voraussetzt. Die Rechnungen sind deshalb ohne Bedeutung für die Gletscherbewegung, wie dies überhaupt von den meisten Rechnungen gilt, die hierüber angestellt wurden, mögen in ihnen nun Differentialgleichungen aufgestellt oder die größten Chikanen der mathematischen Physik angewandt werden. Sie sind gezwungen, eine Reihe solcher Vernachlässigungen eintreten zu lassen, daß die Resultate kaum annähernd der Wirklichkeit entsprechen können.

Dies gilt z. B. auch von einer Arbeit des Lord Raleigh: Über Ströme zäher Flüssigkeiten, insbesondere in zwei Dimensionen (Phil. Mag. 36 pag. 508). Hatte der Verfasser die Vorsicht gebraucht, den Titel der Arbeit so zu formulieren, daß die Bewegung des Gletschers aufser Spiel blieb, so zeigte sich doch, daß er seine Rechnung gerade zur Anwendung auf Eisströme durchgeführt hat.

Leider gilt das, was wir über die Ergebnisse der mathematischen Rechnung gesagt, auch von allen Versuchen, den Gletscher künstlich nachzubilden. Erst neuerlich ist der Versuch wieder von K. R. Koch gemacht worden (Zeitschr. des D. u. Ö. Alpenv. 1893). Hier besitzen gewöhnlich die zur Darstellung des Gletschers verwendeten Materialien (weiches Wachs, warmes Kolophonium mit Wachs und Pech) eine Reihe von Eigenschaften nicht, die das Gletschereis hat. Mit diesen Versuchen ist wohl die Möglichkeit einer Demonstration einzelner Gletschererscheinungen gegeben, aber es ist unmöglich, diese Versuche in Beziehung zu den Gletschererscheinungen zu setzen, ein Resultat, das um so bedauerlicher ist, als damit der Versuch, den Gletscher im kleinen künstlich darzustellen als bis heute noch nicht gelöst hingestellt wird, so wünschenswert die Lösung dieser Aufgabe zum tieferen Studium der Gletschervorgänge ist.

Unter die Gruppe von Hypothesen, die heute wegen des Widerspruchs mit der Erfahrung aufgegeben sind, sind auch die zu rechnen, die die Bewegung auf Vergrößerung der Gletscherkörner zurückführen, so bedeutsam diese sich auf diese Hypothesen gründenden Theorien gerade dadurch sind, daß sie die

Aufmerksamkeit auf das Gletscherkorn gelenkt haben. So sind die Theorien von Hugi, Elie de Beaumont, H. Ladame, Nicolet, Grad, Bertin und schliesslich von Forel, die alle durch gefrierendes Infiltrationswasser das Gletscherkorn wachsen lassen, heute wegen der geringen Infiltrationsfähigkeit des Eises als unhaltbar erwiesen. Forel hat sich daher heute anderen Theorien angeschlossen, nachdem ihm vor allem Heim die Unmöglichkeit seiner Hypothese nachgewiesen hatte. Forel erklärte übrigens die Gletscherbewegung nicht ausschliesslich durch das Kornwachstum, nur überwiege die dadurch bedingte Bewegung die durch die Schwere, Regelation, Plasticität verursachte Bewegung. Auch sucht er die gefundenen Erscheinungen experimentell zu bekräftigen.

Ebenso fallen unter die obige Kritik alle die Theorien, die allein das Gleiten des Gletschers als Ursache der Bewegung annehmen. Wenn schon ein Gleiten stattfindet, wie Experimente von Merian und Hopkins zeigen — es ist ein Gleiten von Eisblöcken auf geneigten Steinplatten schon bei 40' Neigung beobachtet worden — so lehrt doch schon ein flüchtiger Blick auf die Gletschererscheinungen, dass ein Gleiten allein nicht zur Erklärung der Bewegung ausreicht. Altmann, Gruner und Hopkins haben diese Erklärung der Bewegung gegeben und damit Hypothesen geschaffen, die an sich nicht im Widerspruche mit der Erfahrung stehen, aber nicht ausreichen, um alle Gletscherphänomene zu erklären. Etwas weiter geht in dieser Beziehung Saussure. Er hat grossen Wert auf das Gleiten des Gletschers gelegt, sich aber nirgends dahin geäussert, dass es die einzige Ursache der Bewegung sei, wie vielfach behauptet wird. Im Gegenteil scheint ihm, wie aus manchen Stellen hervorgeht, eine Verschiebung der Theilchen gegeneinander nicht fremd gewesen zu sein.

Hat uns so die Ansicht von Saussure einen Faktor zur Erklärung der Gletscherbewegung geliefert, so gilt dasselbe von den Untersuchungen Thomsons. Er nimmt als einzige Ursache der Bewegung die Verflüssigung des Eises unter Druck an, der durch die eigene Schwere des Gletschers hervorgebracht wird. Da der Akt der Verflüssigung Wärme braucht, ist das Wasser unter 0° abgekühlt. Es quetscht sich in benachbarte Teile des Eises, die unter geringerem Drucke stehen, und gefriert dort wieder. Dass diese Erklärung nicht ausreicht, zeigen uns die neuerdings an Gletscherkörnern gemachten Beobachtungen, auch scheint die Anwendung der Theorie auf die Blaublätterstruktur nach Emden nicht mit der Erfahrung übereinzustimmen. Trotzdem hat die Hypothese, wenn wir sie nicht allein zur Erklärung der Gletscherbewegung annehmen, in ihrem Grundgedanken bleibende Bedeutung.

So liessen sich hier fast alle älteren Theorien noch anführen, fast alle nehmen der Erfahrung widersprechende oder unzureichende Hypothesen zu Hülfe.

Dieser Standpunkt ist nun heute glücklicherweise in der Hauptsache als überwunden anzusehen. Der Einfluss der Methoden der exakten Wissenschaften, vor allem der Physik, hat darin eine Änderung

gebracht. Schon die Reisenden beschränken sich jetzt auf eine genaue Beobachtung der Thatsachen und suchen selbst oder überlassen auch anderen diese Beobachtungen experimentell zu bestätigen, wobei dann die Variation der Bedingungen des Experimentes näheren Aufschluß geben kann über Ursache und Wirkung.

So sucht man heute zunächst die allgemeinen physikalischen Eigenschaften des Eises genau zu ergründen und nimmt dann schliesslich zur Erklärung dieser experimentell gefundenen Eigenschaften, wie überall in den Naturwissenschaften, eine Hypothese zu Hülfe. Da sie letzte Naturerscheinungen zu erklären hat, so wird sie sicher eine definitive Hypothese sein, so lange es nicht gelingt, durch Variation der experimentellen Bedingungen weiter das Verhältnis von Ursache und Wirkung festzulegen. Sie kann auch nie in Widerspruch mit der Erfahrung stehen, da sie eben den Zusammenhang der letzten Naturerscheinungen vermittelt, und alles übrige aus ihnen experimentell folgt. Allerdings befinden sich diese Arbeiten über Gletschertheorien noch recht im Anfangszustand, da man heute zunächst das Eis in rein physikalischer Hinsicht ohne seine geographischen Beziehungen zum Gletscher studiert, doch ist man auf dem besten Wege, klare Vorstellungen zu bekommen. Es hat indessen auch hier Jahrzehnte bedurft, ehe die Physik helles Licht in die Erscheinung bringen konnte. Dies ist schliesslich gelungen, indem man in der Untersuchung einer Eigenschaft des Eises, die wir heute als allgemeinste kennen, und die daher eine ganze Reihe von Eigenschaften in sich schliesst, nämlich in der Untersuchung der Plasticität des Eises unermüdlich war. Die folgenden Zeilen sollen den Stand dieser Untersuchungen klarlegen.

Es empfiehlt sich aber, ehe man zu den neueren Untersuchungen geht, die das Gletscherkorn berücksichtigen, eine kurz gefasste Geschichte der Arbeiten über Eisplasticität voranzuschicken, die das nicht thun, um für die neuen Untersuchungen den historischen Zusammenhang berücksichtigen zu können.

A. Die geschichtliche Entwicklung der Erkenntnis der Plasticität des Eises ohne Berücksichtigung seiner Struktur.

Der erste, der dem Eise völlig bewußt die Eigenschaft der Plasticität zugeschrieben hat, ist Bordier (1750). Die Anschauung aber, daß sich Eis wie weiches Wachs verhält, geht aber in ihren Anfängen noch weiter zurück.

Im Jahre 1716 wurde ein kleines Werk von einem Mitglied der Akademie der Wissenschaften zu Paris, Mairan, herausgegeben, dessen deutsche Übersetzung mir leider nur zur Verfügung stand. Sie betitelt sich „Abhandlung von dem Eisse“. Es werden darin eine Menge von Beobachtungen mitgeteilt, über deren Schärfe man erstaunt ist. Der Ausspruch Friedrich Martens, eines Hamburgers (vergl. Ratzel, Biographie Martens in den A. D. Biogr.) „das Eise in Spitz-

bergen sei hart wie Stein und zugleich so schwammig wie ein Bimsstein“ regt ihn zu Untersuchungen über das Verhalten des Eises an. Er stellte sich in einer eisernen Röhre einen Eiscylinder her und legte ihn auf zwei Stützen; in der Mitte hing er ein Körbchen an den Cylinder und legte in dasselbe so viel Schrote, bis der Cylinder zerbrach. Er beobachtete, daß er bei verschiedenen Versuchen mit Stäben gleicher Dimensionen verschiedene Gewichte zum Zerbrechen brauche, je „nachdem mehr oder weniger Luftblasen im Eisse waren, nachdem sie darinne mehr oder weniger gleichförmig ausgebreitet waren, und nachdem das Eiss schon eine längere oder kürzere Zeit gelegen hatte“. Auch wußte er, daß sich die Belastung, die den Stab zum Brechen bringt, mit der Temperatur ändere, daß „das Eiss desto stärkeren Widerstand thut, wenn es zerbrochen werden soll, je größer die Kälte ist.“ Dazu aber fügt er: „Die Zähigkeit der Teile eines Körpers, welche das Hauptsächlichste in dem Widerstande des Eisses ausmacht, ist nicht einerley mit dem, was man seine Härte nennet, obgleich die eine dieser Beschaffenheiten nicht leicht ohne die andere ist.“ Als weiteren Beweis dafür, daß Eis nachgiebig ist, führt er an, daß in Rußland ein 20 Fufs hoher Palast aus Eis gebaut wurde, ohne daß durch das Gewicht des Daches die untersten Teile beschädigt wurden. Dabei wurden auch Kanonen aus Eis auf der Drehbank hergestellt. Es zeigte sich, daß die Gewalt von $\frac{1}{4}$ Pfund Pulvers bei der Explosion gegen die Eisswände, die nicht viel über 3—4 Zoll dick gewesen sein sollen, dem Eise keinerlei Schaden zugefügt hatte.

Dann tritt die Anschauung, daß sich Eis wie Wachs verhalte, erst in dem für die ganze Gletscherkunde klassischen Aufsätze des Bischofs von Annecy, des gelehrten Rendu wieder auf, „der das geheimnisvolle Dunkel der Gletschererscheinungen mit Adlernaugen durchdrungen hat“, so daß die folgenden Arbeiten, von ungefähr 1841 bis 1865 nur als eine Ausarbeitung und Ergänzung der Fragen und Probleme erscheint, die Rendu gegeben hat, was bei einem Manne, der bereits eine klare Vorstellung vom Energieprinzip hatte, kaum Wunder nimmt. Wie er nur da Gesetze aufgestellt wissen will, wo eine Reihe sichere Beobachtungen vorliegen, zeigt folgende Äußerung, die er macht, als er von der Gletscherbewegung handelt, die ihm als „gordischer Knoten“ erscheint: Sobald die Autoren die Bewegung erklären wollen, fallen sie in das Leere und werden oft lächerlich. Vielleicht kann man mit längeren Beobachtungen und mit gut ausgeführten Experimenten über Eis und Schnee zum Ende kommen, aber die ersten Elemente fehlen uns noch. In seiner Arbeit: *Théorie des Glaciers de la Savoie*, die sich in den *Mémoires de l'Académie Roy. d. Sc. de la Savoie* findet, behauptet er auf pag. 48, daß eine Reihe von Thatsachen darauf hindeuteten, daß das Gletschereis dehnbar sei, daß es sich wie ein weicher Teig an den Felsen anschmiegen könne, damit aber stehe im Widerspruche, daß man sonst das Eis nur als spröden Körper kenne. Aber er wagt nicht, eine endgültige Entscheidung zu treffen, denn auf pag. 93 wirft er in der ihm eigenen geistvollen Weise eine Reihe von Fragen auf, die nachher unabhängig

alle zum Ausgangspunkt von besonderen Theorien gemacht wurden, ohne sich für eine derselben zu entscheiden. Le glacier, sagt er, marche-t-il ensemble comme un bloc de marbre sur un plan incliné? — Avance-t-il par parties brisées comme les cailloux, qui se suivent dans le couloir des montagnes? — S'affaisse-t-il sur lui-même pour couler le long des pentes, comme il ferait une lave à la fois ductile et liquide? — Les parties, qui se détachent vers les pentes rapides suffissent-elles à imprimer du mouvement à celles, qui reposent sur une surface horizontale? — Je l'ignore!

Zeigt sich hier der weise Meister der Beschränkung, so hat er auch noch anderweit nur der Meinung Ausdruck gegeben, daß das Eis möglicherweise ein plastischer Körper sei. Er sagt in seiner Arbeit, daß es nicht „unmöglich sei“, daß das Eis seiner Härte und Sprödigkeit ungeachtet doch einen bestimmten Druck aushalten könne, ohne zu zerbrechen. Allein, meint er, das Eis der tiefsten Schichten stehe unter einem zu hohen Drucke, es zerbreche und weiche so an der Basis aus.

Dieser auf so ausgezeichneten, klaren Verstand gestützten Arbeit stehen eine Reihe mehr phantasiemäßiger Schöpfungen gegenüber, die bei Gelegenheit der Schilderung der Gletscherwelt Ideen über die Plasticität des Eises durchblicken lassen. Als Verfasser solcher sind z. B. Bourrit, Simond Hall u. a. zu erwähnen. Hier sei nur auf eine Bemerkung Halls hingewiesen (Patchwork vol. 1 pag. 104 ff.). Er schreibt: „Wenn sich folgende Schneelagen oft von mehreren 100 Fufs Mächtigkeit durch Einwirkung der Sonne und der unzähligen Giefsbäche, die sich von allen Seiten auf dieselbe ergießen, schmelzen, der vielen Sommerregen nicht zu gedenken, so müssen sie eine Masse bilden, die keineswegs flüssig ist, doch ein Bestreben hat, auf dem Abhänge, auf dem sie liegt, hinabzugleiten, deren Teile nicht nur von den von den verschiedensten Seiten herunterrinnenden, aus dem schmelzenden Schnee entstehenden Bächlein schlüpfrig geworden sind, sondern durch die Reibung alter früherer Gletscher poliert worden sind. In jedem Sommer rücken diese mächtigen, trägen, halb schneeigen, halb eisigen Anhäufungen etwas, wenn auch nicht viel, vor.“

Sicher hat hierbei Hall das dunkel vorgeschwebt, was die ihm folgenden Autoren Plasticität nannten.

Deutet Rendu nur eine Reihe von Problemen an, die zur Erklärung der Gletscherbewegung herangezogen werden könnten, so spricht nun Forbes bestimmt die Ansicht aus, daß das Eis plastisch ist.

Im Edinb. Phil. Journ. Jan. 1842 sagt er gelegentlich der Schilderung des Rhonegletschers, daß er sich ausbreite, wie es der aus einem Kübel gegossene Mörtel thun würde, und im April desselben Jahres vergleicht er die Bewegung des Gletschers mit der eines glühenden Lavastromes.

War mit diesem Vergleich nur der Anfang zu einer Theorie gegeben, so zeigte sich bereits in seinem 1843 erschienenen Werke: *Travels through the Alps of Savoy* die Ansicht ausgebildet, daß „die Bewegung des Gletschers jener einer zähen Flüssigkeit gleicht.“ Auch

stellte er zur Bestätigung dieser Meinung Experimente an, die allerdings heute hinfällig sind. Das Bedenken Rendus: „möglich, daß mit größeren Massen angestellte Versuche andere Resultate liefern“, beseitigt er dadurch, daß er sagt: Wir können die Beobachtung großer Massen gerade am Gletschereise vornehmen. Sie eben begründet die Meinung, daß Eis plastisch ist. Denn:

1. Die verschiedenen Teile von Querschnitten eines Gletschers bewegen sich mit verschiedener Geschwindigkeit, am schnellsten in der Mitte.
2. Dieselben Umstände, welche die Flüssigkeit eines Gletschers vermehren — Hitze und Feuchtigkeit — beschleunigen auch dessen Bewegung.
3. Die Struktur-Oberflächen, durch Spalten veranlaßt, welche die innere Gletschermasse durchziehen, sind auch die Oberflächen größter Spannung in einer halbflüssigen plastischen Masse, in einem geneigten Kanale liegend.“

Durch die Bemerkung, daß das Eis während des kalten Winters zur größten Festigkeit neigt, zeigt er, daß er bereits die Abhängigkeit der Plasticität von der Temperatur kennt. Aber gerade an dieser Stelle zeigt sich, wie mangelhaft seine Vorstellung von der Eisplasticität war, da er den Eisstrom unmittelbar in Analogie zum Wasserstrom setzt. Diesen Vergleich lieferte er allerdings in späteren Schriften, die seine Hypothese in geläuterter Form brachten, so z. B. in den *Phil. Trans. of the Roy. Soc. of London* 1846, fallen, zumal sie ihm einige Entgegnungen einbrachten, und er bezeichnete dann den Gletscher als eine thonartige, plastische Masse, die in das Thal hinabhinne, wie eine Lavamasse, wie das schon von Darwin beobachtet wurde.

Forbes, dem so das Verdienst zukommt, mit vollem Bewußtsein auf die Eisplasticität aufmerksam gemacht zu haben, läßt sich indessen auf eine Erklärung der Plasticität nicht ein. Er sagt zwar:

Der Gletscher bewegt sich wie ein halbflüssiger Körper, wie auch andere Körper, die im gewöhnlichen Leben fest erscheinen, ja sogar brüchig sind, wie Pech, vorausgesetzt, daß eine genügende Kraft einen langen Zeitraum auf sie wirkt. Der Einfluß der Zeit besteht hauptsächlich darin, daß der Druck, der nicht ausreicht, um die Teile zu trennen, sie zwingt, übereinander zu gleiten, so daß die Bewegung sich ohne Zerreißen und Brüche vollzieht.

- Dabei bleibt aber das „Warum“, das wirklich Erklärende unberücksichtigt.

Die Annahme Forbes der „viscosité de la glace“, die in den größten Zügen die schönen Versuche von Tresca später in ihrer Richtigkeit bestätigten, brachte einen ganzen Sturm in seiner Zeit hervor. Diejenigen, die das Eis nur als einen starren, spröden Körper oft nur aus der Umgebung ihres Ortes kannten, konnten sich von einem plastischen Verhalten des Eises nicht überzeugen und gingen zu den alten Gleitungstheorien zurück.

Unter Forbes Gegnern verdient ein Mathematiker, Hopkins, hervorgehoben zu werden; denn der Wandel seiner Ideen unter dem Einfluß einiger Entgegnungen, und der Einfluß, den seine durch diese umgewandelten Anschauungen auf Tyndall ausübten, wirft ein helles Licht auf die damaligen Meinungen über das plastische Verhalten des Eises.

Hopkins hatte noch nie einen Gletscher gesehen. So erst ist es verständlich, wenn er dem Eise die Plasticität anfangs völlig absprach und zur Gleitungstheorie zurückging. Er suchte diese Theorie durch Experimente zu bekräftigen, deren oben schon Erwähnung gethan wurde. Auf Grund dieser Gleitungsversuche kommt er zu dem Resultat: Vorübergehende Formenänderungen kommen nur innerhalb der Elasticitätsgrenze vor, dauernde Dehnungen seien undenkbar.

Als nun aber verschiedene Beobachtungen die Unmöglichkeit seiner Theorie, daß der Gletscher als Ganzes gleite, zeigten, ändert Hopkins seine Ansicht, und läßt eine Art Plasticität zu. Er theilte nämlich den Gletscher in longitudinale Schnitte, von denen jeder an der Seite des anderen mit verschiedener Geschwindigkeit gleite. Durch diese Annahme bekam der Gletscher nun die Fähigkeit, sich an Hohlkehlen anzuschmiegen, um Inseln zu fließen, durch sie wurde auch die grössere Geschwindigkeit in der Mitte erklärt. Als man aber zeigte, daß der Gletscher keine Spuren solcher Gleitebenen aufwies, nahm er an, daß dieselben die Continuität nicht stören, also unsichtbar seien. Aber auch die Zuflucht zum Unsichtbaren rettete ihn nicht; denn seine Behauptung, daß eine quer über den Gletscher laufende gerade Linie nach einiger Zeit kaskadenförmig würde, wurde widerlegt von Martius und Forbes. Schweren Herzens erkannte er nun die Eisplasticität an. Eis habe zwar eine gewisse Plasticität, aber sie zeige sich erst nach sehr langer Zeit und genüge nicht, die Bewegungserscheinungen zu erklären. Dazu äußert sich Whewell (Phil. Mag. XIII) sehr treffend: Es sei höchst seltsam, daß die Plasticität sich erst nach sehr langer Zeit zeigen soll, während sie thatsächlich von dem Moment an zu beobachten sei, da der Schnee in Eis übergehe. Zeit brauche natürlich jede Naturerscheinung.

An Erklärungsversuchen der von Forbes dem Eise zugeschriebenen Plasticität hat es natürlich nicht gefehlt. Es sei nur einer wegen seiner historischen Bedeutung erwähnt. M. Tümpfer, Mitglied der „Réunion des naturalistes Suisses“ nimmt (Actes de la Société Helvét. des Sc. nat. 1842) das Wasser zu Hülfe. Er meint, daß das Wasser in die Haarspalten eindringe und so gewissermaßen das Eis gelenkiger mache. Diese Idee wird dann von einem Engländer M. Gutherland (Phil. Mag. vol. 32 pag. 232) ziemlich phantastisch weitergeführt. Sie nimmt nun Agassiz in seinem „Système Glacière“ auf. Er schreibt dem Wasser bekanntlich drei Wirkungen zu, die zur Vorwärtsbewegung des Gletschers beitragen: 1. Wirkung durch das Gewicht, 2. Erzeugung der Dickflüssigkeit und 3. Wirkung des Gefrierens durch Volumenvergrößerung.

Uns können hier nur die beiden letzten Punkte interessieren. Agassiz meint, Gletschereis zeige sich bei 0° völlig verschieden von dem, das

unter niedrigerer Temperatur stehe. Das Hauptmerkmal ist, dafs es bei niedrigerer Temperatur die Eigenschaft der Plasticität verliert und steif und spröde wird.

Da man nun dem Wasser die Fähigkeit zuschreibe, den Gletscher auf 0° zu erhalten, so sei nicht unwahrscheinlich, dafs dem eindringenden Wasser die Eigenschaft zugeschrieben werden müsse, dafs es die Plasticität und Beweglichkeit seiner Teile bedinge. Das Nähere ist für ihn nicht genügend bekannt, er enthält sich auch jeder weitem Hypothese. Seine Entdeckung, dafs die Kälte nicht tief in die Gletscher einzudringen vermöge, verwertet er dazu, das Gletschereis auch im Winter als plastisch hinzustellen und so die Bewegung des Gletschers im Winter zu erklären. Der Gletscher trocken nie aus, meint er, 1. weil die Kälte nicht tief eindringen kann und 2. weil die Haarspalten das Wasser durch Kapillarwirkung festhalten. Ausgetrocknetes Eis von 0° ist nach seinen Beobachtungen spröde und hart an der Oberfläche des Gletschers, eine Erscheinung, die thatsächlich stattfindet, die aber, wie der zweite, experimentelle Teil dieser Arbeit zeigt, auf anderen Ursachen als auf Wasserinfiltration beruht.

Die Idee nämlich, die Plasticität durch einsickerndes Wasser zu erklären, ist eine Hypothese, deren Existenzberechtigung fordert, dafs ein solches Eindringen von Wasser in dem Mafse, wie dies die Hypothese voraussetzt, experimentell bestätigt wird. Das ist aber von keinem der obigen Autoren geschehen, und nach neueren Versuchen wird diese Voraussetzung als falsch nachgewiesen. Daher fällt auch diese Hypothese, obwohl sie durch gute Beobachtung gestützt war, in das Gebiet eines geistreichen, phantasievollen Gedankens, der aber das Erscheinen anderer Theorien nicht hindern konnte.

Es waren die Gebrüder Schlagintweit, die mit scharfem Forscherblick erkannten, dafs es richtiger sei, auf die ursächliche Erklärung der Plasticität zunächst zu verzichten, dafs es viel wesentlicher sei, die Eigenschaft der Plasticität des Eises experimentell zu studieren. In ihrem berühmten Werke: Untersuchungen über die physikalische Geographie der Alpen in ihren Beziehungen zu den Phänomenen der Gletscher etc. versuchen sie die Plasticität des Eises nicht als eine Eigenschaft des Eises überhaupt, sondern als eine besondere Eigenschaft des Gletschereises anzusehen. A. und H. Schlagintweit sind meines Wissens die ersten, die streng experimentell vorgehen. Stehen sie damit schon ganz im Strome neuerer Forschungen, so ist doch leider die Anwendung dieser physikalischen Untersuchungen auf die Erscheinungen des Gletschers nicht einwandfrei, da die Experimente nicht den Verhältnissen entsprechen, wie wir sie beim Gletscher vorfinden. Leider trifft dieses Urteil auch ihre Forschungen über Eisplasticität, so grofs auch der durch dieselben gemachte Fortschritt ist.

Die Verschiebbarkeit der Gletschermassen könne kaum, so meinen sie, als eine Eigenschaft des Eises an sich betrachtet werden. Es besitzt dieses ja einen scharfkantigen, muscheligen Bruch. Es zeigt sich vielmehr im Verhältnis zu anderen Körpern als ein sehr spröder, zerbrechlicher Körper (vergl. Mallet, Transact. Geol. Soc. Dublin

1838 und Phil. Mag. vol. 26). Auch Risse, Spalten etc. sprechen für eine geringe Plasticität. Dies bestätigen ihnen nun auch ihre Versuche, die sie mit Magnus über den Einfluß des Druckes auf die Zerspaltung des Eises mit einer hydraulischen Presse anstellten. Die erhaltenen Risse, die das Eis enthielt, machen es ihm bei der Bewahrung der Form der Luftblasen wahrscheinlich, daß der Gletscher im großen die Erscheinung der Plasticität zeigt, indem auf Druckwirkung, unter der das Gletschereis speciell dauernd steht, diese Risse entstehen und das Eis ausweicht. Der Widerstand, der von der unebenen Unterlage gegen die Eismassen ausgeübt wird, bedingt zum Teil jene feine Zersplitterung mit, die ihrerseits die Struktur des Gletschers hervorruft.

Diesem Resultate, das, da es experimentell bestätigt wird, einen sehr überzeugenden Eindruck macht, ist aber entgegenzuhalten, daß es nur eine Folge der Bedingungen ist, unter denen die Experimente vorgenommen wurden, diese aber und damit das Resultat selbst den Verhältnissen bei den Gletschern nicht gerecht werden. Denn erstens herrscht ein großer Druck nur am Boden des Gletschers. Nur gelegentlich kommt es vor, daß durch Stauung auch die Schichten der Oberfläche von starkem Druck beansprucht werden, wie die Spaltenbildung an der Oberfläche zeigt. Zweitens aber findet die Druckänderung nicht so statt, wie es die Experimente zeigen. Sondern der Druck ändert sich meist allmählich und wächst viel zu langsam, als daß dieses Wachstum durch den Druck der hydraulischen Presse verwirklicht werden könnte. Daß Eis bei momentanem Druck spröde ist, zeigt jedes Stück Eis, das auf den Boden fällt, und auch bei ihm lassen sich die Risse in der Druckrichtung bei einiger Aufmerksamkeit feststellen. Derartige Änderungen des Druckes finden aber bei einem Gletscher nur statt, wenn plötzliche Neigungsänderungen des Untergrundes vorhanden sind, also z. B. bei Terrassenstürzen, oder wenn der Gletscher plötzlich in eine Thalerweiterung eintritt. Dann stimmt das Verhalten des Gletschers mit dem Experimente, das Schlagintweit ausführte, überein. Dann zersplittert sich das Eis, fällt in große Blöcke auseinander, die dann das Bild einer Ruine geben, die noch vor nicht allzu langer Zeit ein stattliches Schloß war.

Überdies kommt auch bei dieser Erscheinung nicht allein Druck in Frage. Das Eis der Gletscher wird durch die Schwerkraft auch auf Zug beansprucht. Sobald dieser plötzlich eine Änderung von genügender Größe erfährt, überwindet er die Kohäsion der Teilchen, und es treten auch hier Erscheinungen auf, wie sie die Experimente Schlagintweits zeigten.

An demselben Fehler — daß nämlich die Experimente, aus denen die Plasticität gefolgert wird, nicht den Vorgängen am Gletscher entsprechen — leiden nun die berühmten Arbeiten Tyndalls, die in der Hauptsache in dessen Werke *Glaciers of the Alps* niedergelegt sind, das in dankenswerter Weise auch dem größeren deutschen Publikum durch die neuerlich im Druck erschienene Übersetzung von

Frau Dr. C. Wiedemann zugänglich gemacht worden ist. Da die Arbeit ein ganz neues Licht über die Auffassung der Plasticität des Eises bringt, soll genauer auf dieselbe eingegangen werden.

Von der Frage ausgehend, wie Eis solche Deformationen eingehen kann, wie oben beschrieben, meint er, die einzige Theorie, die unsere Aufmerksamkeit verdient, sei diejenige, welche zur Erklärung dem Eise Zähflüssigkeit zuschreibt. Andererseits steht aber gerade diese Theorie im Gegensatze zu unserer Erfahrung im täglichen Leben. Indem er nun diesen Widerspruch experimentell entscheidet, kommt er zu seinen oft wiederholten und berühmten Experimenten über die Regelation.

Nachdem er sich gefragt, ob die Viscosity bei Eis von einer Temperatur, die nahe bei 0° liegt, so vorzustellen sei, wie wir warmes Wachs zähflüssig nennen, oder ob die Wärme, die das Eis aufnimmt, den Molekülen eine solche Freiheit im Spiel gäbe, die uns die Erscheinung als „viscous“ bezeichnen läßt, bringt er einige Beispiele aus dem praktischen Leben, die darin gipfeln, daß er dem Leser zeigt, daß man in ein Eisseil bei genügendem Drucke Knoten knüpfen könne. Daraus aber ist nur zu folgern, daß das Eis viscous ist, ob aber so wie Wachs oder anders, ist damit nicht erwiesen. Tyndall pfeifte nur Eis in verschiedene Formen unter hohem Drucke und beobachtete dabei, daß das Eis zerbrach und nachher die Form der Mulde annahm. Ändert sich also bei hohem Drucke die Form langsam, so wird auch das Eis seine Form kontinuierlich ändern. Diese Art von „viscosity“ nennt er „plasticity“ und meint, daß schon Agassiz in diesem Sinne Forbes gegenüber die Begriffe getrennt habe. Das dürfte aber vielleicht mehr in Agassiz und Forbes Meinung hineingelegt heißen, als sie es selbst wollten. Die scharfe Trennung der Begriffe ist gerade das Verdienst Tyndalls, und er selbst war sich dessen wohl bewußt, da er sagt: Meine Aufgabe ist es, klare Begriffe abzugrenzen, die keine physikalischen Irrtümer enthalten.

Zur Erklärung des plastischen Verhaltens des Eises benutzt er nun die Regelation, die von Faraday entdeckt worden war. Wenn zwei Stücke Eis von der Temperatur von ungefähr 0° in Berührung gebracht werden, so frieren sie wieder zu einer starren Masse zusammen. Wenn nun der Zusammenhang durch Druck im Eis gelöst wird, so stellt sich nach der Aufhebung des Druckes die Kontinuität durch Regelation zwischen den Bruchflächen, die in Berührung stehen, wieder her. Die Umformung eines geraden Prismas durch Druck in ein „krummes Prisma“, das wieder aus einem Stücke ist, wird also nicht durch eine eigentliche Zähflüssigkeit des Eises hervorgerufen, sondern ist durch Zerbrechen und Regelation bedingt.

Auf Zug fand er das Eis spröde. Er hebt hervor, daß Eis in der Nähe von 0° im Verhältnis zu dem Eise von niedriger Temperatur weich zu nennen sei, daß aber diese Weichheit etwas anderes ist, als wenn man Wachs, Honig, Teer etc. weich nennt. Alle diese Dinge seien auf Zug und Druck nachgiebig, und wenn wir den Ausdruck zähflüssig auf Eis von 0° anwenden, so sei das ungenau.

Der scheinbare Widerspruch der Plasticität und Sprödigkeit des Eises wird durch folgende Hypothese beseitigt. Die Zerbrechlichkeit des Eises und die Eigenschaft wiederzusammenschmelzen erlauben ihm eine kontinuierliche Formenänderung. Dazu läßt Tyndall, was meist übersehen worden ist, noch bis zu einem gewissen Grade ein Gleiten des Gletschers als Block zu.

Die Tyndall'sche Hypothese läßt heute große Zweifel aufkommen. Es ist keine Frage, die Regelation wirkt mächtig bei der Gletscherbewegung mit und vor allem bedingt sie das Verheilen der Spalten, und niemand wird dem großen englischen Physiker das Verdienst schmälern wollen, dies aufgeklärt zu haben. Aber daß Bruch und Wiedergefrieren wirklich die Hauptursachen des Fließens sind — das bleibt noch zu beweisen.

Wenn es sich um wirklichen Bruch handelt, wie dies die Experimente Tyndalls zeigen, so ist doch nicht zu vergessen, daß im Gletschereise völlig die Spuren dieser Brüche fehlen. Das gesunde Eis, das den Gletscher in der Hauptsache ausmacht, ist nicht in Stücke gebrochen, es ist nicht einmal im vulgären Sinne rissig, und trotzdem soll das Eis fast in jedem Momente seine Form durch Bruch ändern, trotzdem soll es eben wie eine sehr stark zähflüssige Masse durch Bruch fließen.

Uebrigens leiden die Tyndall'schen Experimente zur Anwendung auf die Gletscherbewegung an einem ähnlichen Mangel wie die der Gebrüder Schlagintweit. Abgesehen davon, daß es, wie die Zukunft gelehrt hat, wünschenswert war, für die Experimente Gletschereis zu verwenden, läßt auch Tyndall den Druck zu plötzlich wirken. Die Eismasse zerspringt natürlich dadurch in tausend Splitter, was bei einer allmählichen Umformung durchaus nicht stattfindet.

Sicherlich kann ein Eisblock in tausend Stücke zerbrechen, die dann wieder unter Druck zusammenschmelzen. Gehen aber auch kontinuierliche Formenänderungen auf diese Weise vor sich? und ist die Regelation das einzige Agens um eine Formenänderung hervorzurufen? Diese Fragen bleiben immer noch bestehen.

Ehe wir auf die Versuche eingehen, die sich mit der weiteren Lösung der Frage beschäftigt haben, sei es gestattet, ein Experiment Tyndalls zu diskutieren, das zu dem Resultat führt, daß Eis wohl plastisch im vulgären Sinne sei, diese Plasticität aber nicht ausreiche, um die Gletscherbewegung zu erklären.

Tyndall beobachtete, daß ein auf dem Gletscher so abgestecktes Quadrat, daß eine seiner Seiten parallel zum Bettrand, seine andere Seite auf der Mitte des Gletschers liegt, mit der Zeit zum Parallelogramm wurde. Die Diagonale dehnte sich um 0,000 044 der ursprünglichen Länge in 24 Stunden. Daraus schließt nun Tyndall, daß das Eis nicht einmal diese Dehnung vertrage, sondern Spalten bilde.

Dagegen ist nun aber folgendes einzuwenden: Erstens weiß man nicht, welche Kräfte an der Stelle thätig waren, da sich der Gletscher nicht nur vorwärts bewegt, sondern steigt oder fällt, ja meist das Eis auf Torsion beansprucht. Zweitens aber hängt die Wirkung der Kräfte

stark von der Eisstruktur ab. Eis von anderer Struktur würde vielleicht keine Spalten gezeigt haben. Auf der Inhomogenität des Eises beruht nun wohl auch der Unterschied in den Resultaten bei der Wiederholung des Experimentes von Mathews und Reilly. Letzterer fand, daß sich oft die Pfähle näherten, um sich bald wieder zu entfernen. Die Messungen ergaben im Durchschnitt 0,000 010 der Länge als Vergrößerung, also der $4\frac{1}{2}$ te Teil von Tyndalls Messungen, und heute wissen wir, daß Eis unter günstigen Umständen eine viel größere Dehnung zuläßt, als man damals glaubte.

So zeigten die Experimente Tyndalls zwar das physikalisch höchst interessante Resultat, daß die anfangs abenteuerliche und unnatürliche Behauptung, daß das Eis sich in Formen bringen lasse, doch ihre Richtigkeit hat, aber für die Gletschervorgänge brachten sie nur teilweise eine Erklärung und mußten gerade aus dem Grunde anregend wirken, wie das thatsächlich auch geschah. Reusch und Helmholtz nämlich beschäftigten sich weiter mit dem Problem; Reusch in einer Arbeit, die in Pogg. Ann. Bd. 121 pag. 873 unter dem Titel: „Beitrag zur Lehre vom Eis“ und nach ihm Helmholtz mit mehr Glück in jener bekannten Schrift, der eine im Februar 1865 zu Heidelberg gehaltene Vorlesung zu Grunde liegt: Über Eis und Gletscher, und die völlig neues Licht in das Problem brachte.

Nach einer optischen Betrachtung des Eises geht Reusch zu einem Kapitel „Über die scheinbare Plasticität des Eises“ über und führt Experimente aus, die typisch für die folgende Zeit geworden sind. Reusch will versuchen, die von Tyndall erwähnte Deformierbarkeit oder scheinbare Plasticität des Eises durch einen direkten Versuch nachzuweisen.

Es gelang ihm in der That, allerdings nur ein einziges Mal, eine dünne Lamelle dauernd zu krümmen, indem er sie zwischen den Fingern bog. Eislamellen von 100 cm Länge, 12 mm Breite, 3 mm Dicke hing er in zwei 80 cm von einander entfernte Schleifen. In der Mitte war wiederum eine Schleife an den Stab gehängt, an der ungefähr 180 g zogen. Wenn die Temperatur über Null war, so zeigte sich nach 20 — 30 Minuten eine Durchbiegung von 6 — 8 mm.

Die theoretischen Betrachtungen, die sich an dieses Experiment schliessen, sind wegen der geringen Anzahl der Versuche ohne Belang. Recht durchsichtig ist die Erklärung des Vorganges. Reusch meint, die Kohäsionskraft müsse überwunden werden; daß dann aber kein Bruch eintrete, sei dem Vorgange der Regelation zuzuschreiben.

Merkwürdig erscheint hiernach ein drittes Kapitel, in dem die Sprödigkeit des Eises hervorgehoben wird.

Reusch giebt zunächst Methoden an, um eine Eistafel zu zerteilen, wobei er zu dem Schlusse kommt, daß ein Messer auf Eis gerade wie ein Diamant wirke. Die vom Messer in die Tiefe gedrückten Teile wirkten wie Keile, die das Eis zersprengen. Allerdings ist diese Teilung des Eises unmöglich, wenn die Oberfläche mit Wasser bedeckt wird; denn da das Wasser eindringt und sofort gefriert, wird der Sprung bald wieder oberflächlich geschlossen. Alles dies beweist

Reusch, obwohl er im vorangehenden Kapitel eine starke Plasticität durch Experimente nachgewiesen hat, daß das Eis selbst in einem dem Schmelzen außerordentlich nahen Zustande noch vollkommen spröde ist „und daher von einer Plasticität des Eises nicht entfernt die Rede sein kann.“ Leider läßt er diesen Widerspruch unaufgeklärt, der ihn zur Klarheit über den Begriff Plasticität hätte führen können.

Gerade darin liegt die große Kluft, die seine Arbeiten von den geradezu grundlegenden Experimenten Helmholtz's trennen.

Helmholtz sagt in der oben angeführten Schrift:

Man könnte daran denken, daß ein Block durch den Druck im Innern der Presse zu feinem Staub zermalmt würde, daß er sich in jede Ecke einfügen kann, und daß dann dieses Eispulver wie Schnee, wieder durch Zusammenfrieren vereinigt würde; man könnte daran um so mehr denken, als man in der That, während man die Presse antreibt, fortdauerndes Knarren und Knacken des Eises im Innern der Form hört. Indessen schon das Aussehen des aus Eisblöcken geprefsten Cylinders kann uns belehren, daß er nicht auf diese Weise entstanden ist. Solche Cylinder sind nämlich klarer als das aus Schnee geprefste Eis, und man erkennt in ihnen noch die größeren Stücke wieder, die man dabei verwendet hat, freilich in veränderter, platt gedrückter Form. Am schönsten zeigt sich das, wenn man die zwischen den Eisstücken entstehenden Hohlräume mit Schnee ausstopft. Dann zeigt der Cylinder abwechselnd Schichten klaren und trüben Eises. Die klaren Eisstücke zeigen sich auch in diesem Falle in platte Scheiben zusammengeprefst.

Auch Helmholtz hat, wie Tyndall, infolge zu großen Druckes ein Zerbrechen des Eises wahrgenommen, indessen führten ihn gerade die darauf bezüglichen Versuche zu den Resultaten, die seine Arbeit über die des großen englischen Physikers hebt.

Er pefste einen Cylinder, den er schon durch Pressen erhalten hatte. Wie wir später sehen werden, giebt zufälligerweise auch plötzlich angewandter Druck dem Gletscher adäquate Erscheinungen. Man hört wohl auch ein Knacken und Knallen, aber der Cylinder ändert allmählich seine Form, er bricht nicht, wird nur niedriger, dafür aber dicker und spaltet sich schließlic am Rande.

In dem Momente, da man die Presse antreibt, beobachtete Helmholtz, wie eine unermessliche Zahl feiner Sprünge wie eine trübe Wolke durch den Cylinder schossen, die zum großen Teil, wenn der Druck nachliefs, wieder verschwanden, obwohl ein solcher Eisblock unmittelbar nach den Versuchen erheblich trüber als vorher war. Diese Trübung rührt, wie man mit der Lupe erkennen kann, von einer Anzahl haarfeiner Linien her, die das Innere der Eismasse durchziehen. Diese Linien sind der optische Ausdruck äußerst feiner Spalten, die sich durch die Masse des Eises ziehen.

Aus seinen Beobachtungen zieht nun Helmholtz den großen Schluss: der Eisblock zerspringt in sehr kleine, eng nebeneinander liegende Teilchen, die sich verschieben und dadurch dem Druck ausweichen können. Hinterher werden die Spalten, die luftleer sein sollen, wieder zusammen-

frieren und da, wo die Partikelchen nicht genau aufeinander passen, freie Räume lassen.

Schmilzt dann ein solches Eis, so entstehen die Spalten wieder, füllen sich mit Wasser, und das ganze Stück zerfällt in eine Menge von vieleckigen, unregelmäßigen Körnern. In ihnen erkennt nun Helmholtz die Gletscherkörner.

Wie neuere Untersuchungen ergeben haben, wie vor allem Emdens Beobachtungen gezeigt haben, ist nun jedes Eis nach einigen Tagen von körniger Struktur. Helmholtz dreht also hier Ursache und Wirkung um. Die Körnerstruktur ist nicht eine Ursache des Druckes, sondern ist Bedingung für die verwickelten Erscheinungen, die das Eis bei Druck zeigt.

Der ungeheure Fortschritt aber, der durch Helmholtz in der Erkenntnis der Plasticität des Eises gemacht wurde, liegt darin, daß er die Kornstruktur in Beziehung zur Plasticität bringt.

Diese Kornstruktur hat er auch unter dem Polariskop untersucht. Er sagt:

Die oben beschriebene körnige Struktur des Eises zeigt sich sehr hübsch im polarisierten Licht. Wenn man in der eisernen Form ein klares, kleines Stück Eis zu einer Scheibe von etwa 5 mm auspresst, so ist es durchsichtig genug, um untersucht werden zu können. Man sieht dann im Polarisationsapparate in ihrem Innern eine große Menge verschiedenfarbiger, kleiner Felder und Ringe und erkennt durch die Anordnung der Farben leicht die Grenzen der Eiskörnchen, welche mit mannigfach verworfener Richtung ihrer optischen Achsen aneinander gelagert sind und die Platte zusammensetzen. Der Anblick ist wesentlich derselbe sowohl im Anfange der Ausübung des Druckes, als wenn man die Platte eben aus der Presse genommen hat, und die Sprünge in ihr noch als weiße Linien erscheinen, wie auch später, wenn durch beginnende Schmelzung sich die Spalten mit Wasser gefüllt haben.

Merkwürdig erscheint hiernach, warum Helmholtz nicht gewöhnliches Eis, das keinem Drucke ausgesetzt war, unter dem Polariskop untersucht hat.

Diese klassischen Untersuchungen von Helmholtz bilden nun den Ausgangspunkt aller neueren Arbeiten über Plasticität, über die im nächsten Kapitel berichtet wird. Haben sie sich auch nicht als endgültige erwiesen, so geht man doch heute noch bei den Untersuchungen über Plasticität zurück auf das Eiskorn. Erst die neueste Zeit hat mit ihren ausgebildeten experimentellen Hilfsmitteln vermocht, volle Klarheit in das Verhältnis des Gletscherkorns zur Plasticität des Eises zu bringen.

Diese Untersuchungen von Helmholtz wurden indessen, so merkwürdig sie waren, bedauerlicherweise zunächst nicht weiter verfolgt. Vielleicht ist ein Grund für diese eigentümliche Thatsache, daß der Name Helmholtz für die Vollständigkeit der Untersuchungen bürgte.

Nicht unmöglich ist es, daß Tresca durch die Experimente Helmholtz's angeregt wurde. Tresca zeigte wie selbst harte Metalle sich in beliebige Formen pressen lassen, also auch plastisch sind.

Eine ganze Reihe mühsamer Versuche vernachlässigen leider die von Helmholtz hervorgehobene Struktur, die sich in der Folge als außerordentlich wichtig erwiesen hat, so daß die meisten der Untersuchungen heute nur historisches Interesse haben. Überdies scheint bei mehreren Verfassern die Arbeit von Helmholtz überhaupt nicht bekannt gewesen zu sein. Die Jahre 1870—1878 bringen eine Reihe solcher Untersuchungen. So veröffentlicht H. Moseley im Philos. Magazin 4. Serie, Band 39 eine Arbeit: On the Mechanical Properties of Ice.

Nachdem er die Ausdehnung des Eises besprochen hat, wendet er sich zu interessanten, allerdings heute für die Wissenschaft geringen Wert besitzenden Untersuchungen über die Zähigkeit des Eises.

Er armierte einen Eiscylinder, der 30 cm lang war, konische Enden hatte, in der Mitte einen Durchmesser von $3\frac{3}{4}$ cm besaß, durch zwei Holzblöcke, die so aufeinander paßten, daß sie die Konen umschlossen. Jeder trug einen Haken. Am oberen wurde das Ganze befestigt, während an den unteren Gewichte zur Belastung gehängt wurden.

Das erste Experiment wurde an einem heißen Sommertage ausgeführt, wo das Eis weich war. Die übrigen Versuche wurden im Oktober ausgeführt. Der erste Stab liefs bis zum Zerreißen eine Belastung von 70—100 Pfund, die anderen, bei niedrigerer Temperatur geprüften Stäbe liefsen bis zu 120 Pfund Belastung pro Quadratzoll zu.

Dann versuchte Moseley Eisstäbe durch Druck zu trennen. Ein Eiscylinder von $3\frac{3}{4}$ cm Durchmesser und 5 cm Länge wurde zwischen 2 Brettern 40 Minuten auf 289 kg beansprucht. Er zeigte bei geringer Mehrbelastung Sprünge und Spalten.

Ein anderer, der eingesetzt wurde und 15 cm lang war, zeigte, wie Moseley meint, Fehler, da er sich bog, überdies bildete sich bei ihm eine Ebene heraus, längs deren sich der Cylinder bei einer Belastung von 273 kg scherte. Moseley findet aus den begreiflicherweise überaus abweichenden Resultaten, daß, um einen Cylinder durch Druck zu zerbrechen, eine Belastung von 101,8 kg pro Quadratzoll nötig sei. Es folgert daraus, daß eine ungefähr 200 m hohe Eissäule ihren Fuß zerbrechen müßte. Da aber kein Gletscher so stark sei, so meint er, sei durch dieses Experiment die Antwort auf die Theorie, die ein Zerbrechen annimmt, gegeben. In beiden Experimenten erwies sich anfangs das Eis nachgiebig.

Schließlich suchte Moseley noch die Kraft zu bestimmen, die nötig ist, um einen solchen Cylinder zu scheren. Er brachte zu dem Ende zwei axial durchbohrte Holzblöcke so aneinander, daß einer am andern in Rinnen gleiten konnte. Wurde dann durch die Bohrung ein Eiscylinder gesteckt und der eine Block belastet, so trat allmählich mit dem Wachsen der Belastung Scherung ein. Nach einer halben Stunde schon zeigte sich ein Cylinder von $3\frac{3}{4}$ cm Durchmesser bis zur Hälfte abgeschert. Die angewandte Kraft betrug 100—120 Pfund pro Quadratzoll, die Temperatur war allerdings weit über 0° .

Zeigen diese Experimente die hohe Plasticität des Eises, so hat Moseley doch dabei die Struktur vernachlässigt und konnte daher nicht zu klaren Resultaten gelangen. Gerade jener Cylinder, der sich krumm

bog, den er deshalb für fehlerhaft hielt, mußte ihn eigentlich auf die Struktur hinweisen. Trotzdem haben seine Versuche eine gewisse Wichtigkeit. Sie sind nämlich typisch in Bezug auf die Apparate für die künftige Zeit. Leider leiden Moseleys Versuche noch an einem weiteren Fehler, der schon von Ball im folgenden Bande des Phil. Mag. hervorgehoben wird. Sie sind bei einer zu hohen Temperatur ange stellt, als daß sie eine Anwendung auf Gletscher gestatten könnten.

Auf eine Berücksichtigung der Struktur verzichtet ebenfalls bei seinen Untersuchungen über Plasticität des Eises (Nature, vol I pg. 534. On the Mechanical Properties of Ice and their Relation to Glacier's Motion) Mathews. Er nahm Eisstäbe und unterstützte sie an beiden Enden; sie bogen sich durch eigene Schwere bei der Gefriertemperatur durch, so daß schließlich der Durchbiegungspfeil $17\frac{1}{2}$ cm betrug. Die Unterfläche zeigte dabei kleine Spalten.

Mathews schließt daraus, daß sich Eisstäbe schon durch die eigene Schwere bei Temperaturen über und unter Null Grad plastisch deformieren. Demzufolge will er auch, daß die Plasticität neben anderen Faktoren der Bewegung mehr in die Gletschertheorie aufgenommen werde, als es bis zu seiner Zeit geschehen.

Seine Experimente regten wiederum Tyndall zu einigen Versuchen an, über die er in Nature einen Bericht „On Bending of Glacier Ice“ veröffentlichte, und die höchst interessant sind.

Er benutzte Gletschereis von dem heute in dieser Hinsicht geradezu klassisch gewordenen Morteratschgletscher. Das Eis schien ursprünglich klar, erwies sich aber bald als Konglomerat von Gletscherkörnern, wie wir heute die Polyhedra, aus denen das Eis Tyndalls zusammengesetzt war, nennen. Als Mathews dieses Eis nach Art der Experimente Moseleys unterstützte, zeigte sich nach 12 Stunden eine Wirkung.

Dann wurde Eis aus einem Schuttkegel, das besonders fest ist, belastet; der Stab brach, ehe eine Durchbiegung bemerkt wurde. Legte man kleinere Stäbe gekreuzt auf die Öffnung eines Kastens, so daß die eine Lamelle ungefähr $\frac{1}{4}$ cm von der anderen entfernt war, und belastete man die obere, so war schon nach zwei Stunden die obere an die untere angefroren. Tyndall trennte sie wieder und belastete eine dieser Lamellen für sich in der Mitte. In einigen Stunden hatte sie sich fast 5 cm durchgebogen. Er wollte bei dem Versuche die umgewendete Lamelle durch Aufsetzen eines Gewichtes zurückbiegen, aber „owing to my want of delicacy in putting the weight, or through the intrinsic brittleness of the substance itself“ brach der Stab.

Ferner beleuchten Experimente von Bottomley (Nature V 1872 Regulation of Ice) die große Plasticität des Eises, ohne daß dabei auf die Struktur geachtet wird. Der Experimentator legt ein Stück Eis auf starke Drahtgaze, über das Eis ein Brett und belastete dieses mit 6 kg bei $+15^{\circ}$ C 6—8 Stunden lang. Es zeigte sich, daß das Eis durch die Gaze gedrückt war. Zur Erklärung dieser Thatsache benutzt Bottomley die Regulation.

Durch diesen Versuch aufmerksam gemacht, führte er noch folgende Experimente aus.

An eine Eisdrahtschlinge, die um einen zu beiden Seiten unterstützten Eisstab herumlag, wurde ein Gewicht gehangen. Der Draht ging bald bei 1 kg Belastung durch das Eis durch und fiel samt Gewicht herunter. Das Eis indes blieb ungeteilt, und es war keine Spur von einem Dünnerwerden da zu finden, wo der Draht durchgegangen war. Nur war das Eis an der Durchgangsstelle undurchsichtig geworden. Die Erklärung dieses plastischen Verhaltens entnahm Bottomley dem Gesetze der Regelation. Dafs sie wirklich bei der Erscheinung im Spiele ist, erkennt man recht hübsch aus folgendem Versuche:

Bottomley nahm einen Bindfaden als Schlinge und belastete ihn. Da zeigte sich, dafs der Bindfaden nur eine Zacke in das Eis drückte, aber sonst einfro. Der Bindfaden wirkte wie ein Schwamm und sog das Wasser auf, verhinderte dadurch aber die Regelation. Das zeigte sich zufällig recht deutlich an einem Drahte, der plötzlich im Eise nicht weiter ging. Es erwies sich, dafs das Wasser heraus gelaufen war, so dafs der Draht in einem Loche locker safs.

Sobald die Temperatur unter den Gefrierpunkt fiel, mußte das Gewicht stark vermehrt werden, und wenn die Temperatur einige Grade unter dem Gefrierpunkt lag, mußte die Last so groß sein, dafs das Eis brach.

Seine Versuche setzte gewissermaßen John Aitken fort. Sie sind auch in der Nature (vol. VI. 1873) veröffentlicht unter dem Titel: Glacier Motion.

Er belastete auf Eis liegende Geldstücke mit Gewichten. Sie sanken allmählich ein, wenn die Temperatur die des Gefrierpunktes oder höher war. Aber schon bei $-1/3^{\circ}$ C zeigte sich keine Spur von Einsinken in das Eis, obwohl das Geldstück mit 90 Pfund $3\frac{1}{2}$ Stunden lang belastet war.

In einer zweiten Arbeit (Nature, vol. VII.) zeigt derselbe Verfasser, dafs das Eis, das Luftblasen enthält, sich schneller biege, als das Eis, das luftfrei ist. Dabei scheint die Temperatur Einfluß auf die Stärke der Biegung zu haben. Es sei aber schwierig, hieraus Gesetze ableiten zu wollen, da sich dieselben Stäbe bei derselben Temperatur um verschiedene Beträge durchbögen. So viel aber konnte doch erkannt werden, dafs bei niedrigerer Temperatur die Stäbe sich weniger bogen. Dabei war allerdings die niedrigste Temperatur nur -1° C.

Durch seine Untersuchungen kommt Aitken zum Schluss, dafs das Eis so plastisch ist, dafs es in seinem Bett fließen kann. Aber er nimmt durchaus nicht einen einseitigen Standpunkt ein. Ausdrücklich fügt er hinzu, dafs bei der Gletscherbewegung auch noch andere Faktoren thätig seien. Für die Bewegung kommt: 1. Das Gleiten auf seiner Unterlage in Frage. 2. Sobald Eis an Hindernisse kommt, taut es, indem durch Druck der Gefrierpunkt erniedrigt wird. 3. Der Druck macht die unteren Teile flüssig. 4. Spalten erleichtern das Vorrücken, da kein Gegendruck da ist, und endlich 5. auch das eindringende Wasser bedingt eine Bewegung des Eises.

Es ist nur zu bedauern, dafs Aitken sein Augenmerk nicht auf die Eisstruktur gerichtet hat, denn dann würden seine Experimente durchsichtig geworden sein.

Unabhängig von diesen beiden untersuchte Bianconi die Plasticität des Eises. Von seinen Abhandlungen habe ich nur durch einige Referate Kenntnis. Er presste bei einer Temperatur über 0° Steine in das Eis. Nach ungefähr 6 Stunden drang der Stein ein, und an seinen Rändern zeigten sich wulstförmige Erhebungen. Eine auf das Eis gepresste Eisenplatte liefs allmählich eine Eissäule durch ein rechteckiges Loch quellen. Ein Stab in Eis gepresst zeigte dieselbe Erscheinung, als wenn man ihn in einen Thonbrei drückte. Bianconi nahm Eisbretter und bog sie wie Wachs; durch Umdrehen der Lamelle gelang es ihm, die Durchbiegung rückgängig zu machen.

Mit ähnlichen Experimenten beginnt Pfaff seine Arbeit: Versuche über die Plasticität des Eises. (Sitzungsber. d. phys. med. Soc. in Erlangen, Heft 7, 1875.)

Er geht davon aus, dass die ihm vorangegangenen Forscher zu großen Druck verwendet haben, um rasche, sichere Resultate zu erhalten. Er schließt sich an Moseley's Versuche an, um genauere Werte des Druckes zu erhalten, der nachweisbar eine Formenänderung nach sich zieht. Er fand überraschende Resultate. Sie zeigen, dass auch auf geringsten Druck, wenn er nur anhaltend wirkt, und die Temperatur des Eises und der Umgebung nahe bei 0° liegt, das Eis plastisch ausweicht.

Schon bei 2 Atmosphären zeigte sich das Eis nachgiebig, so dass z. B. ein hohler Eisencylinder in 2 Stunden bei -1 bis $0,5^{\circ}$ C 3 mm tief in das Eis eindrang. Die Temperatur zeigte sich bei gleichen Drucken von enormem Einfluss. Derselbe Cylinder sank bei -4° bis -1° um $1\frac{1}{4}$ mm unter 2 Atmosphären in 12 Stunden, bei -6° bis -12° in 5 Tagen und unter 5 Atmosphären 1 mm, d. h. also auf 1 Stunde und 1 Atmosphäre berechnet — unter der Voraussetzung, dass das Einsinken proportional mit Druck und Zeit vor sich geht, was wohl bei den kleinen Beträgen gestattet ist —: 0,8 mm, 0,053 mm, 0,002 mm. Wenn die Temperatur über 0° war, so sank der Cylinder in einer Stunde um 3 cm ein.

Pfaff schreibt dann: Dass in der That die Schmelzung des Eises, die allerdings wegen der bekannten Erniedrigung des Gefrierpunktes durch Druck unter Null Grad nicht ganz vermieden werden kann, doch von kaum merklichem Einfluss bei diesen Versuchen war, ging daraus hervor, dass der innere Eisylinder vollkommen genau den hohlen Eisencylinder ausfüllte, so dass er nicht herausfiel, sondern herausgepresst werden musste, und kaum eine Spur flüssigen Wassers sich in den Vertiefungen zeigte, die der herausgehobene Eisylinder aufwies.

Es dürfte aber dieses Argument vielmehr für eine plastische Umformung des Eises durch Regelation sprechen. Das Eis wird unter Druck flüssig um so leichter, je höher die Temperatur war. So sank der hohle Eisencylinder ein. Als aber der Druck aufgehoben wurde, regelierten die flüssigen Teile und dehnten sich folglich aus, so dass man den Eisylinder mit Kraft aus der Hohlform pressen musste. Wenn der Vorgang mechanisch wäre, so ist nicht einzusehen, warum das Eis so überaus fest im Eisencylinder safs.

Auch der Mangel an flüssigem Wasser nach dem Experiment beweist nichts gegen den Vorgang des Schmelzens während des Versuchs. Es gefriert eben das Wasser sofort wieder, sobald der Druck aufhört. Druck und Schmelzpunkt sind abhängig von einander. Darin liegt die Schwierigkeit der Temperaturbestimmungen des Gletschereises, da eben der Druck bei der Bestimmung nicht geändert werden darf — ein Punkt, der vielfach bei Temperaturmessungen auch heute noch vernachlässigt wird, indem man meint, die Temperatur des Gletschers bestimmt zu haben, wenn man ein Loch bohrt, in dieses ein Thermometer einläßt und nicht bedenkt, daß die Bohrung des Loches die Druckverhältnisse ändern muß.

Eine andere Versuchsreihe führte Pfaff bei einer Temperatur von $2,5^{\circ}$ C aus und zwar wieder mit hohlen Eisencylindern und einem soliden Stück Stahl von 1 qcm Querschnitt. Bei einem Drucke von $\frac{1}{2}$ Atmosphäre sank der Cylinder in 3 Stunden 14 mm, das Stahlstück bei gleichem Drucke in 5 Stunden 4 mm ein.

So folgert Pfaff, daß Eis bei 0° nur dann nicht mehr plastisch ist, wenn der Druck Null ist. Mit sinkender Temperatur sinkt auch die Plasticität rasch, — in welchem Verhältnisse, gelang auch nicht festzustellen.

Angeregt durch Kane, der beobachtete, wie sich eine Eisscholle, die mit ihren Rändern auflag, im Verlaufe einiger Monate krümmte, bog Pfaff künstlich Eis durch. In 7 Tagen bog sich der Stab bei -12° und $-3,5^{\circ}$ äußerst wenig, ungefähr 2—3 mm in 24 Stunden, so daß die Durchbiegung insgesamt 11,5 mm betrug. Beim Steigen der Temperatur zeigte sich eine rasche Zunahme der Durchbiegung, in 23 Stunden 9 mm, wobei keine Spur von Spalten zu entdecken war. Bei $+30^{\circ}$ wurde ein Durchbiegungspfeil von 23,5 mm beobachtet, ein Resultat, das Tyndalls Meinung, Eis sei nur sehr wenig plastisch, doch nicht umstößt, weil auch Pfaff die Struktur vernachlässigt.

Schließlich suchte Pfaff die Eisplasticität bei Zug zu bestimmen. An ein Eisprisma hing er 3 kg an eine Schnur, die mit glühender Nadel durch das Eis gezogen wurde. Da die Temperatur stieg, schnitt leider der Faden durch. Doch bemerkte Pfaff zwischen zwei angebrachten Marken eine Dehnung von 1 mm. So hat Pfaff zunächst experimentell gezeigt, daß Eis sowohl auf Druck- wie auch auf Zugbeanspruchung ein erstaunlich plastischer Körper ist. Die Temperaturabhängigkeit der Plasticität benutzt er zur Deutung der Änderung der Geschwindigkeit der Gletscher im Sommer und im Winter. Merkwürdigerweise folgert Pfaff aus seinen Experimenten, daß die Gleitungstheorie durch sie eine Stütze erhält. Nicht unwahrscheinlich ist, daß diese Meinung durch die völlige Vernachlässigung der Regolation bei Pfaff entstanden ist. Trotter (Nature VIII, On some physical properties of Ice) zeigt im Gegensatze zu Pfaff, daß beim Abscheren des Eises bei 0° die Eisplasticität unabhängig von der Temperatur sei.

Dies brachte Morgan dazu (Nature 32, Some Experiments of the Viscosity of Ice), diese Frage noch einmal näher experimentell zu prüfen. Er hat seine Versuche bei Kälten von -3° bis -15°

ausgeführt. Es zeigte sich bei allen geprüften Eisstäben, die allerdings von verschiedener Form und verschiedenen Dimensionen waren, keinerlei Wirkung, was auch ziemlich natürlich erscheint, wenn man einem Cylinder von 75 cm Durchmesser bei $2\frac{1}{2}$ —14 kg Belastung eine Durchbiegung zumutet.

Glücklicher war in dieser Hinsicht E. Hungerford: Observations on Snow and Ice under pressures etc. im 23. Band, 3. Serie des Amer. Sill. Journ. Leider sind seine Versuche bei zu niedriger Temperatur ausgeführt, als das ihnen ein hoher Wert für die Gletscherkunde beigelegt werden könnte. Der Schluss, zu dem er unter Verwendung anderer Beobachtungsergebnisse kommt, ist:

Bei Temperaturen auf und über dem Gefrierpunkt ist die Plasticität bedeutend. Bei Temperaturen wenig unter dem Gefrierpunkte ist sie geringer. Bei Temperaturen zwischen $-1,2^{\circ}$ und $-3,5^{\circ}$ ist sie sehr gering und bei Temperaturen unter -12° ist sie Null.

Natürlich sind diese Aufzählungen, so exakt sie erscheinen, doch verhältnismäßig leer, so lange man nicht weiß, was unter Plasticität zu verstehen ist.

Viele von den bisher erwähnten Versuchen werden übertroffen durch die von K. R. Koch mit großer Genauigkeit ausgeführten Messungen (Beiträge zur Kenntnis der Elasticität des Eises. Sitzungsbericht der naturf. Gesellschaft zu Freiburg, auch Wiedemanns Annalen Bd. 25). Leider sind aber auch diese nicht über das Anfangsstadium hinausgekommen.

Koch bedient sich zur Messung der Deformation der Eisstäbe, die auf zwei Lager aufgelegt waren und in der Mitte eine Belastung trugen, eines besonders genau konstruierten Fühlhebels mit Spiegelablesung, dessen Stellung in der üblichen Weise mit Fernrohr und Skala beobachtet wurde. Auf diese Weise gelang es ihm Werte zu erhalten, die bis auf $\pm 0,023$ mm genau waren.

Länge, Dicke und Breite der Stäbe wurden überaus genau bestimmt, für die Länge wurden 30, für die Breite 10 Punkte zum Messen herausgegriffen. Die Stäbe waren aus Seeis, das teils parallel, teils senkrecht zur Gefrierfläche geschnitten war.

Bei der Bestimmung des Elasticitätskoeffizienten stellten sich nun 3 Fehlerquellen heraus: 1. Die durch das Verdunsten, 2. durch die Plasticität, 3. durch die elastische Nachwirkung bedingten Ungenauigkeiten. Wennschon die Plasticität von besonderer Wichtigkeit ist, so hat auch die Elasticität für den Gletscher eine nicht zu unterschätzende Bedeutung. Es fragt sich nämlich, ob die Kräfte, die im Gletscher wirken, die Elasticitätsgrenze überschreiten, die wir beim Eise finden. Es sei deshalb kurz auf diese Frage eingegangen.

Koch untersuchte einen Eisstab von den Dimensionen $314 \times 16 \times 7,8$ mm bei -15° C. Der Stab wurde in 3 Stunden von 200 g um 35 mm Pfeilhöhe durchgebogen. Leider fehlt die Angabe, welches Eis und wie es verwendet wurde, ob beim Versuche die der Gefrierfläche parallele Seite horizontal oder vertikal lag. Auch bei Temperaturen von -25° war die Deformation noch bedeutend. Mufste

nicht der Widerspruch von Pfaffs und Tyndalls Versuchen zu weiteren Forschungen reizen?

Für die Elasticitätskoeffizienten erhielt Koch auch sehr verschiedene Werte, die sich zwischen $800-900 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ bewegen. Da aber die Dimensionsmessungen nicht mit dem Experimente zusammenfielen, und die Stäbe stark verdunsteten, so dürften die Werte der Elasticitätskoeffizienten zu groß sein. Diejenigen, welche aus der Tonhöhe berechnet wurden, waren mit Fehlern behaftet. Überhaupt weichen die von Koch erhaltenen Resultate stark von den von anderen Beobachtern erhaltenen Resultaten ab, wie folgende kleine Tabelle zeigt:

1826	Bevan	590	$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	durch Biegung ermittelt
1871	Reusch	236	$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	unter 0° durch Ton ermittelt
1882	Koch	696	$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-9° durch Biegung ermittelt
1886	Koch	641	$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	$-5,4^\circ$ „ „ „
1886	Koch	884	$\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	-7° durch Knotenabstand bei transversalen Schwingungen ermittelt.

Koch meint nun, daß die Verschiedenheiten der Resultate in den Beobachtungsmethoden liegen. Es dürfte vielleicht richtiger sein, wie es der nächste Abschnitt zeigen wird, diese Unterschiede auf Rechnung der verschiedenen Struktur des Eises zu schreiben. Bei Reusch und bei Koch findet man leider nur Andeutungen der Art, wie das Eis verwendet wurde, so daß die Experimente nur insofern für die Wissenschaft Bedeutung haben, als sie genaue Messungsmittel schufen.

Koch untersuchte aber ferner noch die Plasticität des Eises unter Druck und prüfte die Zähflüssigkeit desselben, indem er Eiscylinder pufste. Die ersten Versuche waren von keinem Erfolge. Erst als er Eiscylinder von 1 cm Radius nahm, beobachtete Koch wirklich bei einem Drucke von 5 kg pro qcm und -14 bis -20° C eine Abnahme der Cylinderhöhe von Stunde zu Stunde. Weitere Versuche bestätigten dies und zeigten eine Zunahme der Plasticität mit der Temperatur. Bei $0,9^\circ$ und $3,4^\circ$ Belastung nahm die Höhe des Cylinders in der Stunde 0,126 mm ab.

Leider sind die Versuche Kochs nur gering an Zahl. Er würde bei der Peinlichkeit der Beobachtung sicher auf die Struktur geführt worden sein. Trotzdem nun in der neuesten Zeit die Abhängigkeit der Plasticität von der Struktur allgemein anerkannt ist, finden sich doch noch eine Anzahl Arbeiten, die bei der Betrachtung der Plasticität auf die Bedeutung der Körnerstruktur verzichten.

So untersucht z. B. Townbridge in einer Arbeit Elasticity of Ice (American. Sill. Journal of Science 3 ser. 29), diese sehr gründlich. Aber er benutzt nur Eis, das künstlich hergestellt war, und seine Arbeit ist aus dem Grunde, weil sie nicht auf die Plasticität des Eises direkt eingeht, hier von untergeordneter Bedeutung.

Recht bezeichnend für die Widersprüche, die sich bei der Betrachtung der Plasticität des Eises finden, wenn man auf die Berück-

sichtigung der Struktur verzichtet, ist ein erbitterter Streit über die Sprödigkeit oder Plasticität des Eises, wie er sich, durch andere Fragen über glaciale Erscheinungen angeregt, in den Spalten der *Nature* vol. 49. 1893 findet. Er wird zunächst von Howorth und Wallace geführt, dann gesellen sich zu diesen noch Delley und la Touche. Niemand kam auf den Gedanken, gegen Howorth, der die Plasticität des Eises so gut wie völlig leugnet, also auf dem Standpunkte Tyndalls steht, nur dafs er die Regelation noch ausschliesst, auf die neueren experimentellen Untersuchungen hinzuweisen. Erst John Tennant machte dem Streit ein Ende, indem er die oben erwähnten Experimente Canons, Moseleys und Trotters ins Feld führt.

Ferner erschien im Jahre 1892 eine Arbeit von Thomas Andrews (*Observation on Pure Ice* in den *Proc. of the Roy. Soc. of London*), die auch Strukturverhältnisse vernachlässigt und sich daher vergeblich abmüht, Klarheit in die Erscheinung der Plasticität des Eises zu bringen.

Nicht allein aus destilliertem Wasser hergestelltes Eis, sondern auch natürliches, auf der Oberfläche eines grossen Wasserreservoirs entstandenes wurde untersucht. Die Beobachtungen am natürlichen Eis fanden im Freien, die an reinem, künstlichen Eis im geschlossenen Raume statt. Als Mass der Plasticität, dessen Andrews zum Unterschied von den meisten ihm vorangehenden Beobachtern bedarf, galt die Geschwindigkeit, mit welcher ein Stahlstab unter einer Belastung von $90\frac{3}{4}$ kg bis zu einer gewissen Tiefe einsank. Das untere in das Eis dringende Stabende war flach, ohne jede Zuspitzung. Im geschlossenen Raume wurde das Eis auf verschiedene Temperaturen (-37° , -18° , -2° C) durch Kältemischung gebracht.

Setzt man die Plasticität des reinen Eises bei -37° gleich 1, so ist sie bei -18° gleich 3, bleibt auf dieser Gröfse bis -2° und steigt dann. Je länger Eis vor Beginn der Versuche auf Null Grad gehalten wird, desto plastischer ist es. Natürliches Eis ist plastischer als künstliches. Die Erklärung dieser Erscheinung soll in den Strömungen liegen, die fremde Bestandteile im Wasser, vor allem Salze, beim Gefrieren verursachen.

Auf eine Arbeit R. W. Woods sei hier nur hingewiesen: *Effects of Pressure on Ice* im 41. Bande, 3. Ser. des *Americ. Journ. of Science*, die sich hauptsächlich mit einer Verflüssigung durch Druck beschäftigt.

Schliesslich finden sich neuerdings im *Journal of Geology of Chicago* eine Anzahl von Abhandlungen, die auch die Plasticität des Eises verwerten, und die aber ebenfalls leider mit unter die Arbeiten gerechnet werden müssen, die die Struktur vernachlässigen.

Russell spricht sich in einer Abhandlung: "The Influence of Debris on the Flow of Glaciers" für eine plastische Bewegung der Gletscher aus. *Ice under pressure behaves as a plastic solid*. Leider stützt er sich dabei auf Experimente, die nicht mit Eis, sondern mit anderen plastischen Körpern angestellt wurden. Dies ist auch der Grund, dafs seine Behauptung: „Wenn wir Gletschereis durch Schmutz, Steine etc. verunreinigen, so nimmt die Plasticität ab, wie man daran erkennt,

dafs Wachs mit Steinen durchsetzt langsamer als reines, ja gar nicht fließt,“ nicht einwandfrei ist, so interessant die weiteren, auf dieser Meinung gestützten Ausführungen für die Beurteilung der Thätigkeit des Gletschers sind.

An demselben Mangel leiden auch die in demselben Bande von Case veröffentlichten „Experiments of Ice Motion“. Sie sind an analogen Nachbildungen des Gletschers angestellt, und die damit erzielten Resultate gewiß recht anschaulich. Indessen ist mit Petroleum getränktes Wachs oder Paraffin doch etwas sehr anderes als Gletschereis, und man kann wohl kaum der Meinung Cases beipflichten, dafs es gleichgültig sei, ob die Zähflüssigkeit auf Regelationsfähigkeit, Kornstruktur oder wirklicher Zähflüssigkeit beruhe. Die Einwände, die Case gegen den Grönlandforscher Chamberlain vorbringt, sind, eben weil sie aus seinen Experimenten gefolgert sind, nicht stichhaltig, obwohl es sicher sein dürfte, dafs Chamberlain bei seiner Bewegungserklärung durch Gleiten auf Grund verschiedener Wärmeverteilung die tatsächliche Plasticität zu wenig berücksichtigt hat.

Aus allen diesen Experimenten und aus vielen zerstreuten, kleinen Einzelversuchen und Betrachtungen geht hervor, dafs das Eis bei Temperaturen wenige Grade über und unter Null ein außerordentlich plastischer Körper, im populären Sinne des Wortes plastisch ist. Es schmiegt sich in alle Formen und zeigt eine ziemlich vollkommene Beweglichkeit seiner Teile.

Wie bei jeder Deformation, welche Kräfte sie auch hervorgebracht haben, und wie sie auch vor sich geht, Verlängerungen von gewissen Dimensionen, Verkürzung anderer stattfinden, so hat das eben auch beim Eise ohne Bruch und ohne Zerreißen statt, vorausgesetzt, dafs die Drucke und Züge, die diese Änderungen hervorbringen, genügend langsam und kontinuierlich wirken. Überschreiten allerdings diese Kräfte eine gewisse Grenze, wirken sie plötzlich wie z. B. beim Stofs, dann zerbricht und zerklüftet sich das Eis. Daher bedecken sich die Gletscher an den Ufern mit Spalten und zerbrechen bei einem Sturze in tausend Blöcke.

Wir wissen sowohl aus den Experimenten, als auch aus den Beobachtungen an Gletschern selbst, dafs die gefundene Plasticität vollkommen ausreicht, um die Bewegung der Gletscher zu erklären. Die Beobachtung der Plasticitätszunahme beim Steigen der Temperatur erklärt die Beschleunigung der Gletscherbewegung im Sommer. Die Plasticität giebt auch Aufschluß über die großen Geschwindigkeiten der mächtigen Gletscher Grönlands, die ihre Bewegung selbst im kältesten Winter beibehalten. Sie reicht aber ebenso gut aus, die Gletscherbewegung in den mittleren Breiten klar zu legen. Denn, wenschon der Druck hier geringer ist, so ist doch die Temperatur durchschnittlich größeren Schwankungen unterworfen als im hohen Norden.

Ob nun freilich die Plasticität die einzige Ursache des Fließens des Gletschers ist, das bleibt dahingestellt, ist sogar unwahrscheinlich.

Eine Reihe von Erscheinungen, z. B. das Sommer und Winter unter dem Gletscher hervorquellende Wasser, erfordern, sich mit dem

allgemeinen Begriff „Plasticität“ oder „Formbarkeit“ näher vertraut zu machen und das „Wie“ in der Frage zu berücksichtigen. Das aber gerade war den vorangehenden Autoren nicht zur völligen Klarheit geworden. Erst die Berücksichtigung der Kornstruktur konnte ein helles Licht auf die Plasticität des Eises werfen.

B. Die Geschichte der Erkenntnis der Plasticität des Eises unter Berücksichtigung seiner Struktur.

Die starke Verschiedenheit der Werte für die Gröfse der Plasticität wiesen unmittelbar auf die Heterogenität des Eises hin, und in der That brachten die Strukturverschiedenheiten, die in einigen der bisher angeführten Arbeiten schwach betont wurden, aber sichtlich als unwesentlich unbeachtet geblieben waren, die Erklärung für die großen Abweichungen in den experimentellen Resultaten.

Helmholtz ist es wohl in erster Linie zu danken, auf das Verhältnis der Struktur des Glescherkornes zur Eisplasticität aufmerksam gemacht zu haben. In den Vordergrund aber wurde dieser Punkt erst durch Heim gerückt, dem sich die bedeutenden Alpenkenner Hagenbach und Forel anreihen. Es ist erstaunlich, dafs man die Struktur des Eises, obwohl man sie schon lange kannte, nicht eher in die Untersuchungen des plastischen Verhaltens des Eises hineingezogen hat.

Heim schließt sich unmittelbar an die Experimente von Helmholtz an. Er beschließt den Abschnitt, der über diese berichtet: (Gletscherkunde pg. 22):

„Also auch hier plastisches Ausweichen auf Druck durch innere Zerteilung in einem Mafse, wie es die Experimente über die Umformung ohne Bruch niemals als möglich erscheinen liefsen und weit gröfsere Umformungsfähigkeit der Masse mit brecciös körniger Struktur als derjenigen ohne Struktur.“

Daran nun schließt sich die Beschreibung einiger höchst bedeutungsvoller Experimente. Heim hatte einen Eiscylinder ein Jahr lang in einem Keller liegen gehabt. Jede Struktur schien dem unbewaffneten Auge sowohl im Cylinder als auch auf der Bruchfläche verschwunden. Der Cylinder wurde geprefst, und beim ersten Anziehen der Presse erschien die Struktur wieder. Die Körner, in der Gröfse von Kirschkernen, erschienen wieder, blieben klar und verhielten sich wie mechanische Einheiten. So gelang es Heim mit diesem Cylinder die Experimente von Helmholtz durchsichtiger auszuführen, indem er das Eis zusammenzupressen suchte; dabei sprangen an der Seite Körner ab. Hieraus geht hervor, sagt Heim, „dafs die Kornstruktur im Gletschereis nicht durch Regelation verschwindet, sondern die Umformbarkeit desselben wesentlich erhöht. Vielleicht dürfen wir mit Bestimmtheit sagen: die Kornstruktur bedingt vorwiegend die ganze Plasticität des Gletschers und damit das Fliefsen.“

Auch hat Heim auf dem Gletscher Geräusche gehört, die denen gleichen, die der Gelenkitakolumit hervorbringt. So kommt er zu

dem Schlusse, dafs da, wo dem Eis, das gleichmäfsig kompakt ist, Umformungen zugemutet werden, die zu stark sind, als dafs sie ohne Bruch eintreten könnten, durch innere Teilung eine Kornstruktur entsteht. Wo, wie im Gletschereis, eine von anderen Ursachen sich herleitende Kornstruktur schon vorhanden ist, passen sich die inneren, notwendigen Zerteilungen derselben an und unterhalten sie.

Heim meint, dafs sich die Plasticität des Eises bei Druck darauf zurückführen lasse, dafs Korn von Korn getrennt werde und sich ausweiche. Die Regelation bedinge, dafs dieser Haufe von Gletscherkörnern nicht wie Kies auseinanderfalle. So müsse jede neue Theorie vom Gletscherkorn ausgehen und dann zu grossen Erscheinungen übergehen.

Dieser neuen Parole folgen nun einige sehr bemerkenswerte Untersuchungen, die aber ziemlich unabhängig von Heims Versuchen zu den gleichen Resultaten führten. Sie setzten ältere Experimente fort, die im Grunde noch in den vorangehenden Abschnitt gehören, aber doch hier aufgeführt werden sollen, da sie die Grundlage zu den weiteren Untersuchungen sind. Diese drei Arbeiten befinden sich in den Proc. of the Roy. Soc., und, da sie grundlegend für alle übrigen Untersuchungen sind, dürfte es sich empfehlen, näher auf dieselben einzugehen.

Mehr anregend als die Erkenntnis fördernd hat eine Arbeit von F. Main gewirkt, die sich im 42. Bande in der oben erwähnten Zeitschrift pg. 491 ff. unter dem Titel: „Note on some Experiments of the viscosity of Ice“ findet. Mains Untersuchungen setzen fort J. C. Connel und A. Kidd: „On the Plasticity of Glacier and other Ice“ (Bd. 44 pg. 331 ff.) und Connel: „On the Plasticity of an Ice Crystall“ (Bd. 49 pg. 232 ff.).

Die ersten beiden Arbeiten benutzen mit geringen Änderungen dieselben Apparate, die, wenngleich auch sie Fehlerquellen besitzen, doch eine überaus genaue Messung zuliefen, und bei der Beanspruchung von Eiscylindern auf Zug sowohl genau die Dehnung, als auch die Belastung abzulesen gestatteten. Verdunstung und Temperaturvariation wurden durch Vorkehrungen verhütet, deren Beschreibung ebenso wie die der Apparate selbst zu weit führen dürfte.

Main führte seine Versuche an Eisstäben von 234 mm Länge aus, die er im Winter 1886 im Engadin herstellte. Um den Einflufs der Regelation zu eliminieren, führte er seine Versuche bei so niedriger Temperatur aus, dafs seiner Meinung nach die Regelation fast völlig ausgeschlossen sein sollte. Die höchsten Temperaturen während der Experimente waren $-2,6^{\circ}$ C im Versuche I, $-1,0^{\circ}$ C im Versuche II, $-0,8^{\circ}$ C im Versuche III. Nun scheint die Trennung der Regelation von rein molekularen Prozessen, wenn man in das Wesen der Plasticität eindringen will, angebracht zu sein. Doch dürfte es zweifelhaft sein, ob es Main thatsächlich gelungen ist, vor allem beim Versuche III die Regelation auszuschliessen, da die Maximaltemperaturen eine geraume Zeit geherrscht haben.

Der erste Stab hatte sich bei einer durchschnittlichen Belastung von ungefähr 3 kg pro qcm (Maximum 5 kg) in 10 Tagen 11 mm,

der zweite bei 2,2 kg pro qcm in 7 Tagen 1,8 mm, der dritte bei 1,9 kg pro qcm in 7 Tagen 1,72 mm gedehnt.

Je größer die Kraft und je höher die Temperatur war, eine um so größere Dehnung konnte beobachtet werden, doch zeigte sich, und das ist Main entgangen, keine einfache, gesetzmäßige Abhängigkeit der Dehnung von der Temperatur und der Kraft. Main selbst sagt zwar, daß die Experimente eher als Beweis für das Vorhandensein einer kontinuierlichen Dehnung unter Zug als zur Bestimmung des Betrags und der Feststellung von Gesetzen dienen können und hält dafür, daß in der Unregelmäßigkeit der Dehnung eine Erklärung der verschiedenen Geschwindigkeiten der Gletscherbewegung liege, eine Folgerung, die wohl bei den niedrigen Temperaturen, bei denen seine Versuche angestellt sind, und die nicht mit den Verhältnissen bei Gletschern im Einklange stehen, etwas gewagt sein dürfte.

Die Größe der Dehnung ist eben nicht nur von der Größe und Wirkungsdauer der Kraft und von der Temperatur, sondern, wie nun Connel und Kidd zeigten, von den Strukturverhältnissen abhängig, die sich während der Dehnung dauernd ändern und so die Resultate beeinflussen.

Von besonderem Interesse ist vielleicht eine Bemerkung Mains, die seinen Experimenten eine erhöhte Bedeutung beimessen läßt. Nach seinen Versuchen hält er nämlich für unrichtig, daß man meistens nicht zwischen plötzlich wirkendem Zuge und solchem, der kontinuierlich wirkt, unterscheidet. Ein Eisstab könne eine Kraft von 4—5 kg pro qcm tragen, wenn sie stetig wirke, eine viel kleinere Kraft aber sei imstande bei plötzlichem Wirken den Stab zu zerbrechen, vor allem, wenn die Kraftverteilung eine unregelmäßige sei.

Wie schon im Voranstehenden mehrfach angedeutet ist, vollenden Connel und Kidd in vielen Beziehungen die Arbeit Mains.

Abgesehen davon, daß sie eine Reihe Verbesserungen an den Apparaten anbrachten, untersuchten sie die Plasticität nicht einseitig auf Zug, sondern berücksichtigten auch das plastische Verhalten des Eises bei Druck. Wenngleich nach der Ansicht von Connel und Kidd die Untersuchungen nicht frei von Fehlerquellen sind — die aber in Rücksicht auf die Schwierigkeit der Umstände fast verschwindend klein sind — so weisen sie doch gerade in der Berücksichtigung der Struktur einen gewaltigen Fortschritt gegen die vorangegangenen Untersuchungen auf.

Beide Beobachter begannen die Fortsetzung der Arbeit Mains in der Meinung, daß der Betrag der Ausdehnung am meisten von der Temperatur und der Zugkraft abhängig sei, und hielten es daher für ein Hauptfordernis, die Temperatur konstant zu erhalten. Aber zufällig zeigten gleich die ersten Experimente, daß nicht nur der Betrag, sondern die Dehnung überhaupt von der Struktur des Eises abhing. Damit kam mit einem Male Licht in die unregelmäßigen Versuchsreihen von Main.

Die Experimentatoren schnitten aus der gefrorenen Oberfläche eines Wasserbades einen Stab aus, der frei von Blasen und klar war, und

schmolzen ihn an seinen beiden Enden an den Apparat von Main an. Als dann ein Zug ausgeübt wurde, zeigte sich, daß anfangs die Dehnung fast Null war, obwohl die Kraft größer war als die, welche Main angewendet hatte. Nach 8 Tagen nahm die Dehnung zu und wuchs 0,00028 mm pro 1 dm in der Stunde. Wahrscheinlich aber ist der Zuwachs der Dehnung der stattgehabten Temperaturerhöhung zuzuschreiben. Diese anfängliche Starrheit konnte aber auch nicht von einer allzuniedrigen Temperatur, die die Regelation ausschloß, stammen, denn in den letzten 24 Stunden stand die Temperatur zwischen -1 und -2° C.

Wenn man nun noch berücksichtigt, daß sich das Eis bei einer Temperaturerhöhung ausdehnt, so bekommt man eine durchschnittliche Belastungsdehnung, die fast Null ist. Der Ausdehnungskoeffizient wurde nach Untersuchungen von Petterson (On the Properties of Water and Ice, Vega. Exp. vol. 2) und Andrews (Proc. of Roy. Soc. 1886 pg. 435) zu 0,000053 bis 0,000075 je nach der Temperatur gerechnet.

Nach dem Experimente wurde das Eis mit dem Polariskop untersucht, und man fand, daß es ein einziger Kristall war, der die bekannten gefärbten Newton'schen Ringe mit dem schwarzen Kreuze sehr schön zeigte. Nach einigen weiteren mit Eis im physikalischen Sinne angestellten Versuchen, die unwesentlich waren, stellten Connel und Kidd Versuche mit Gletschereis an, und zwar benutzten sie Eis aus den Eishöhlen des Morteratschgletschers. Alle drei Versuchsstücke waren aus einer Anzahl von Kristallen zusammengesetzt, die in der Dicke von 2 oder 3 mm bis zu 30 mm, ja bis zu 100 mm variierten. Diese Kristalle sind die Gletscherkörner, und es ist interessant zu verfolgen, wie sich im Laufe der ganzen Untersuchung immer mehr das Augenmerk auf das Gletscherkorn richtet. Connel findet, daß die Körner ineinander passen. Im Winter sieht das Eis in den Höhlen homogen aus, aber sobald es die Sonne bescheint, werden die Körner dem unbewaffneten Auge sichtbar, da sie durch dünne Wasserschichten getrennt sind und sich so durch die verschiedene Lichtbrechung an den Grenzen bemerkbar machen. Obwohl die optische Struktur von jedem Korne unter dem Polariskop vollständig gleichförmig gefunden wurde, so waren doch die Oberflächen vollkommen unregelmäßig und meistens krumm und muschelig. Interessant ist es, daß die Achsen zweier benachbarter Körner ganz nach Belieben angeordnet erscheinen. Der komplizierten Anordnung der Kristalle schreibt Connel es zu, wenn er keine exacte Beziehung zwischen Kornstruktur und dem Betrage der Dehnung feststellen konnte, da auch seine Versuche die Unregelmäßigkeiten zeigen, die schon Main hat. Oftmals dehnte sich eine Seite mehr als die andere, und es ist wohl nicht zufällig, daß das steifste Stück nur aus kleinen Kristallen bestand. Connel äußert sogar einen Gedanken, der in der neuesten Zeit wieder aufgetaucht ist (Emden, Über das Gletscherkorn): die Plasticität sei möglicherweise überhaupt nur eine Eigenschaft des Kornes.

Nun gelang es Connel und Kidd Eis von fast völlig regelmässiger Struktur zu erhalten, und es erwies sich, daß durch die Unter-

suchungen dieses Eises Licht auf das Verhalten der Kornstruktur geworfen wurde.

Dieses Eis wurde aus dem St. Moritzsee erhalten und bestand aus vertikalen Säulchen von ungefähr einem Centimeter Durchmesser abwärts und in der Länge so dick wie die Eisplatte, d. i. 1 Fuß. Jedes Säulchen war ein einzelner Kristall, und die optische Achse lag fast horizontal. In einem anderen Teile des Teiches indessen, der einige Tage früher gefroren war, fanden Connel und Kidd große Kristalle, deren Achsen fast vertikal, aber einander nicht parallel waren. Das Eis der ersten Sorte wurde verwendet. Die Säulchen hatten nicht überall die gleiche Dicke. Meistens endeten sie mit einer Spitze am unteren Ende. Über die Strukturverhältnisse äußern sich die Verfasser folgendermaßen:

Some experience on freezing water in a bath lead us to attribute this curious structure to the first layer of ice, having been formed rapidly in air for instance below -6° C. We found, that if the first layer had been formed slowly, and was therefore homogeneous with the axis vertikal, a very cold night could only increase the thickness of the ice while mantaining its regularity.

Als Objekt wurden Cylinder aus dem geschilderten Eise benutzt, die so herausgeschnitten wurden, daß ihre Achsen parallel zu den Kolumnen lagen. Bei näherer Betrachtung ergab sich, daß der Cylinder ungefähr aus 30 Säulchen bestand, von denen fast jedes den gesamten Eiscylinder durchlief. Die größeren dieser Kristalle hatten ungefähr einen Querschnitt von 35 qmm.

Das Eis streckte sich sehr wenig. Während 7 Tagen war die durchschnittliche Dehnung 0,00004 mm pro dem in der Stunde, obwohl die Temperatur zuweilen bedeutend über Null ($+2^{\circ}$ C) war. Der Zug betrug 2 kg auf 1 qcm. Connel vermutet überdies, daß die geringe Dehnung dem Umstande zuzuschreiben sei, daß es unmöglich sei, das Eis völlig parallel mit den Achsen der Säulchen herauszuschneiden. Wäre das möglich, so würde sich wohl exakt herausstellen, daß ein Kristall senkrecht zur optischen Achse nicht dehnbar sei.

Da das Experiment von so fundamentaler Bedeutung ist, sei hier eine Tabelle mitgeteilt, die sich leicht aus den Angaben der Arbeit konstruieren läßt.

Temperatur am Anfang und am Ende der Beobachtung	Dehnung pro 1 ^h und 1 dem
-5°	0,00006
-4°	0,00001
$-4,1^{\circ}$	0,008
$+2^{\circ}$	ohne Belastung
-1°	0,0001
-5°	0,0002
-6°	

Trotz des hohen Betrages der Dehnung bei $+2^{\circ}$, der gerade für die Gletscher von Bedeutung ist, war in 203 Stunden Belastungsdauer die gesamte Dehnung für 1 dem nur 0,148 auf der einen,

0,048 auf der anderen Seite, so daß sich im Mittel während der ersten 168 Stunden nur 0,00039 mm in der Stunde ergibt, ein Betrag, der sich in den letzten 40 Stunden, wo ein Zug von 2,8 kg pro qcm angewandt wurde, die Temperatur aber, und das ist bemerkenswert, auf -6° C fiel, auf 0,09076 mm steigerte.

Dann schnitt Connel aus demselben Eis einen Cylinder, der 45° Neigung zur Längsrichtung der Säulen hatte und prüfte ihn. Der Unterschied war erstaunlich. Das Stück, welches durch Zug von 2,75 kg pro qcm beansprucht wurde, dehnte sich um 0,015 mm pro dem stündlich aus, also beinahe um das 40fache des Wertes, der sich bei dem Stücke, das parallel zu den Säulenachsen geschnitten war, ergeben hatte. Auch hier zeigten die beobachteten Werte mit den Temperaturen keine Proportionalität, sondern nur eine Neigung mit der Zeit abzunehmen.

Mit diesen beiden Experimenten war die Vermutung erwiesen, daß die Struktur des Eises wesentlich war für sein plastisches Verhalten, und es wäre wohl nun richtig gewesen, die Plasticität eines einzelnen Kornes zu untersuchen und dann den Einfluß der Lagerung zu verfolgen. Leider schlug Connel diesen Weg erst später ein, denn das nächste Experiment zeigt wieder Eisuntersuchungen von heterogener Struktur.

Auch Eis unter Druck wurde geprüft. Man fand, daß sich Eiswürfel bei einem Drucke von 3,2 kg pro qcm in der Stunde und bei einer Temperatur von -6° bis -3° 0,035, 0,055 und 0,007 mm zusammendrücken ließen.

Benutzte Connel 3 Stücke Seeis, bei denen der Druck parallel der Länge der Kristalle ausgeübt wurde, so war die Deformation kaum bemerkbar. Bei einem Drucke von 3,7 kg pro qcm ergab sich in 4 Tagen kaum 0,001 mm pro 1 dem stündlich. Auch bei diesem Versuche vermutet Connel, daß die Verschiebung der Gletscherkörner darauf zu schieben sei, daß der Druck nicht parallel zu den Kolumnen, also nicht genau senkrecht zur optischen Achse stattfand. Überdies scheint auch die Versuchsanordnung Fehler zugelassen zu haben, vor allem scheint die Unterlage komprimierbar gewesen zu sein, denn der größte Betrag der Zusammenziehung fällt in die ersten 36 Stunden.

Es wäre nun vor allem wünschenswert gewesen, mehr Versuche unter Berücksichtigung der Strukturverhältnisse anzustellen. So hätte man Seeisstücke unter verschiedenen Winkeln zu den Achsen der Säulen ausscheiden können und nun zusehen sollen, wie die Plasticität auf Druck- und Zugbeanspruchung von der Schnittrichtung abhängt.

Recht interessant sind die Vergleichen, die die Verfasser aus den thatsächlich bei Gletschern beobachteten Dehnungen anstellten. Aus der Flufsgeschwindigkeit in der Mitte und an den Seiten des Gletschers leiten sie durch eine sehr geschickte Rechnung ab, daß der Maximalbetrag der Dehnung des Gletschereises (Rhonegletscher) auf 0,0029 mm pro 10 cm stündlich zu stehen kommt, ein Resultat, das mit den gefundenen, experimentellen Werten sehr wohl übereinstimmt,

da nur ein Stück des geprüften Gletschereises eine geringere Dehnung besafs. Allerdings wird dabei nicht die Gröfse des Druckes und der Temperatur in Rücksicht gezogen, die bei beiden Beobachtungen stattfand. Nach den neueren Untersuchungen ist wohl zu bezweifeln, dafs beim Gletscher niedrige Temperaturen in Frage kommen. Die Meinung der Verfasser, dafs bei dem Experiment annähernd gleiche Bedingungen vorlägen wie beim Gletscher, dürfte daher wohl nicht ganz berechtigt sein.

Das Gesamtergebnis der Arbeit, abgesehen von dem Hervorheben der Struktur, läfst sich ungefähr folgendermafsen formulieren: Die Ansicht, dafs Gletschereis auf Zug nicht plastisch sei, ist eine irrtümliche. Ein gewöhnlicher Stab von Gletschereis ist im allgemeinen nachgiebig sowohl auf Druck wie auf Zug, wenngleich auf Druck mehr als auf Zug. Aber ein einzelner Kristall, der senkrecht zur optischen Achse beansprucht wird, weicht weder auf Druck noch auf Zug bei bedeutender Belastung aus. Die thatsächlich vorhandenen Ausweichungen sind nach der Meinung von Connel und Kidd auf Fehler des Experimentes zurückzuführen.

Es lag nun nahe, — ja diese Arbeit bekam erst ihren vollen Wert dadurch, — einen Eiskristall für sich zu untersuchen. Dies geschah in einer Arbeit von Connel allein, und die von ihm gefundenen Resultate sind veröffentlicht unter dem Titel: *On the Plasticity of an Ice Crystal* (Proc. of the Roy. Soc. of London, Bd. 49, 1891).

Allerdings zeigt diese Arbeit nicht die Peinlichkeit, die man an der vorangehenden findet. Ganz verwunderlich ist auch, dafs Connel keine Ahnung davon hatte, was auf dem Gebiet anderweit geleistet worden war. Er kennt weder die Untersuchungen Hagenbachs, noch die Emdens und bestätigt unabhängig manches von diesen Autoren gefundene Resultat.

Der verwendete Apparat ist der bekannte: das Eisstück wird an beiden Enden unterstützt. Ein Fühlhebel überträgt den Pfeil der Durchbiegung in gröfsere Dimensionen. (Die Besprechung einiger Fehler, die dadurch in die Versuche hereingetragen werden, dürfte hier zu weit führen.) Connel nahm zuerst ein Stück Eis zum Experiment, das ungefähr aus 12 Körnern bestand, und zeichnete das Stück nach dem Polariskop ab. Nach 2 Tagen hatte es sich bedeutend gebogen. Das Polariskop zeigte, dafs sich dabei die Kristalle geändert hatten.

Deshalb nahm er beim nächsten Experiment eine dünne Eislamelle, die ein einziger Kristall war, und beanspruchte sie auf Zug in der Richtung der optischen Achse. Der Kristall bog sich schnell durch und war bald halbmondförmig. Lange, schmale Blasen, die ursprünglich parallel waren und senkrecht zur Zugrichtung lagen, blieben immer parallel. Der Kristall verhielt sich kurz so, als wenn er aus einer Reihe dünner Blättchen zusammengesetzt wäre, die miteinander durch eine klebrige Flüssigkeit verkittet waren und senkrecht zur optischen Achse lagen. Ihr Gleiten aufeinander wurde durch die klebrige

Flüssigkeit erschwert. Die optische Achse mußte, wie ihre kontinuierliche Biegung im Experiment verriet, stets senkrecht zur Ebene dieser Blättchen bleiben.

Das sollte lediglich eine anschauliche Vorstellung, ein Vergleich von Connel sein. Er erwies sich aber im Verlaufe der Experimente überaus zutreffend, es zeigte sich sogar, wie die Versuche eines andern Autors beweisen, daß er mehr als ein Vergleich ist.

Aus dem Eise eines Wasserbades wurde ein Stück herausgeschnitten. Es enthielt eine Reihe von Blasen, die parallel zur optischen Achse des großen Kristalls war, der fast das ganze Mittelstück des Stabes ausmachte. Die zwei Enden des Stabes waren aus kleineren Kristallen zusammengesetzt. Der große Kristall lag so, daß seine optische Achse vertikale Richtung hatte. Während 9^h 10' hing in der Mitte bei einer Mitteltemperatur von $-3,6^{\circ}$ C ein Gewicht von 1,29 kg an dem Stabe. Er bog sich in der Mitte bedeutend durch. Die Enden indessen lagen in gerader Linie, und das läßt vermuten, daß die Enden der Kristalle in ursprünglicher Lage blieben. Da die Blasen nicht parallel blieben, die Oberflächen Knickungen zeigten, so beweise dies, daß der Erfolg wirklich auf einem Biegen der Blätter beruhe, die senkrecht zur optischen Achse lägen.

Als man nun bei einem Experimente die Achse horizontal legte, konnte wohl bei 1,29 kg Belastung auf den Quadratcentimeter ($-3,3^{\circ}$ Temperatur, 42^h Belastungsdauer) keine Durchbiegung stattgefunden haben. Es wurde zwar $\frac{1}{2}$ mm wahrgenommen, als man den Stab auf eine Zeichnung legte, die vor dem Experiment abgenommen wurde, indem man den Stab mit einem Bleistift umfahren hatte; aber diese Durchbiegung war wohl unscheinbar, da der Stab verdunstet war. Die Ecken waren abgerundet, und die Breite war von 10 mm auf 9 mm gesunken.

Als aber der Stab so gelegt wurde, daß seine optische Achse vertikal war, bog er sich auch sofort durch und zwar 4,4 mm (bei einem Gewichte von 0,62 kg pro qcm, 7,3 cm Entfernung der Stützen, 9^h 15' Belastungsdauer, -3° Durchschnittstemperatur).

Um den Einfluß der Wirkung der Schichten zwischen den einzelnen Kristallen zu prüfen, nahm der Experimentator einen Stab von 3 Kristallen. Der Stab bog sich ein beträchtliches Stück, aber fast die ganze Biegung beschränkte sich auf die Mitte eines Kristalles. Ein Anbringen von Marken an den Seiten des Stabes, um die gegenseitige Bewegung zweier Kristalle und damit die Wirkung der Zwischenschichten studieren zu können, zeigte sich erfolglos. Der Verfasser spricht nach diesem Experiment die Vermutung aus, daß diese Zwischenflächen gar nichts zur Plasticität beitragen, daß sie eher das Wirken der Blätter im Kristall hindern, indem sie den Kristall einigermaßen fesseln.

Connel dürfte doch aber dabei übersehen haben, daß von einer absoluten Starrheit nicht die Rede sein kann, wie seine Experimente beweisen, denn der Dehnungsbetrag seines heterogenen Eiscylinders ist fast stets größer als der eines einzelnen Kristalls von ähnlichen Dimensionen.

In einem weiteren Experimente wurden auf einen Stab Linien auf der einen Seite parallel zu den Ebenen der Gleitflächen geritzt, und dieser Stab dem Zuge parallel zur optischen Achse ausgesetzt. Sollte die Vorstellung von den Gleitflächen ihre Richtigkeit haben, so mußten diese Linien nach dem Experiment wieder parallel erscheinen. Das bestätigte sich sowohl an den künstlichen Linien, wie auch an den Oberflächen einiger Blasen.

Die folgenden Experimente brachten kaum neue Ergebnisse. Nur einzelne Eigentümlichkeiten seien hervorgehoben.

Bei Druckvermehrung springt die Dehnung auf relativ hohe Werte. Als der Druck von 0,74 auf 1,74 kg pro qcm vermehrt wurde, sprang dabei der Pfeilzuwachs von 0,0058 auf 0,410 mm in der Stunde.

Eine höchst merkwürdige Eigentümlichkeit, zeigte sich darin, daß bei gleichbleibender Belastung eine Pfeilabnahme von 0,153 bis auf 0,022 mm in der Stunde statt hatte. Ob man diese Merkwürdigkeit auf elastische Nachwirkung der klebrigen Flüssigkeit zurückzuführen hat, steht dahin. Es scheint allerdings ein Beobachtungsfehler am wahrscheinlichsten, da der Stab während des Experimentes von seinen Lagern glitt. Wenngleich die Messung von neuem begonnen wurde, so weiß doch jeder Experimentator nur allzugenau, wie mangelhaft nach solchen Störungen die Resultate sind.

Ein Kristall, der senkrecht zur optischen Achse beansprucht wurde, zeigte in $21\frac{1}{2}^{\text{h}}$ 0,029 mm, also stündlich 0,0014 mm Durchbiegung; beanspruchte man ihn aber in der Achsenrichtung, so zeigte er sich noch unter -14° plastisch. Bei diesem Experiment zeigte es sich dreimal, daß beim Entfernen der Belastung die Durchbiegung zurückging, wieder ein Beleg für die elastische Wirkung der „klebrigen Flüssigkeit“.

Da in allen Versuchen die gleitenden Flächen, die von Connel senkrecht zur optischen Achse angenommen wurden, zugleich senkrecht zu der gefrierenden Oberfläche lagen, so konnte man diese letztere Eigenschaft als wesentlich für die Lage der Gleitflächen annehmen. Diese Annahme wurde aber durch einen Versuch widerlegt.

Bei allen diesen Versuchen brachten im Momente der Belastung besondere Gewichte eine starke Dehnung hervor. Sie war „größer als proportional zu den Gewichten, aber kleiner als proportional zum Quadrat der Gewichtszuwächse.“

Der Einfluß der Temperatur war meist völlig verwischt. Findet man aber eine Vermehrung der Pfeilgröße um das Doppelte, ja um das Dreifache bei einer Änderung der Temperatur von -10° auf 2° , so ist das sicher auf Beobachtungsfehler zurückzuführen. Verzichtet man indessen auf eine nähere Gesetzmäßigkeit zwischen den Deformationen und der Temperatur, so läßt sich nicht leugnen, daß gewisse Versuchsreihen eine allerdings höchst verwickelte Abhängigkeit zeigen.

Das Resultat der Arbeiten läßt sich hiernach vielleicht folgendermaßen zusammenfassen:

Ein einzelner Eiskristall verhält sich so, als wenn er aus unendlich vielen, sehr dünnen, nicht ausdehnbaren, aber vollkommen biegsamen Lagen, etwa Papierblättern vergleichbar, bestände, zwischen denen eine klebrige Flüssigkeit ist, so daß die Blätter nur unter erschweren Umständen aufeinander gleiten können. Eine geringe elastische Wirkung zwischen den Schichten kann nur vermutet werden. Diese stehen senkrecht zur optischen Achse und behalten auch bei der Biegung diese Eigenschaft bei. Liegt der Stab so, daß der Druck normal zur optischen Achse wirkt, so ist nur eine geringe Deformation bemerkbar, da die Lagen durch die klebrige Flüssigkeit aneinander festgehalten werden. Wirkt aber der Druck in der Achsenrichtung, so zeigen sich beträchtliche Deformationen, deren Pfeile sich nach nicht klar zu ermittelnden Gesetzen ändern. Überschreitet der Zug eine gewisse Größe, so zerbricht der Kristall.

Das Heranziehen von Gleitflächen, auf deren Vorkommen an anderen Kristallen Connell am Ende der Arbeit aufmerksam macht, mag wohl der Grund gewesen sein, daß der ausgezeichnete Kristallograph O. Mügge an die Vollendung der Connellschen Arbeit ging. Sie erschien unter dem Titel: „Über die Plasticität der Eiskristalle“ im Jahrbuch für Mineralogie und Geologie 1895 und brachte die Untersuchungen fast zum Abschluss.

Das Gleiten von parallelen Schichten hatte Mügge an gewissen Kristallen bemerkt, so z. B. an dem Salze $\text{Ba Br}_2 + 2\text{aq}$ (Jahrb. für Mineralogie 1889 I, 1892 II).

Er fand nun, daß es durchaus nicht der gewöhnliche Fall ist, daß die optische Achse der Eiskristalle parallel zur Gefrieroberfläche liegt. Der allgemeine Fall ist der, wie auch Emden hervorhebt, daß das Eis hexagonal kristallisiert. Die Gleitflächen scheinen mit der Basis (Pinakoid OP) parallel der Gefrierfläche zu liegen. Die optische Achse steht also in diesem Falle senkrecht zur Gefrieroberfläche, und OP ist die Gleitfläche.

Mügge wiederholte die Experimente Connells. Er benutzte Eis tafeln, die aus solchem Eis geschnitten waren, das sich auf der Oberfläche einer in die Erde gegrabenen Wanne mit Wasser gebildet hatte. Aus ihr wurden, wie schon Heim gethan, mit einer warmen Säge prismatische Stäbe herausgeschnitten. Diese wurden zwischen zwei Holzschneiden gelegt, und zwischen diesen an dem Eisstabe eine kurze Schnur befestigt, die wegen der kurzen Dauer der Kälte stark (bis zu 5 kg) belastet wurde, damit die Wirkung in kurzer Zeit leicht zu sehen sei.

Mügge beschränkte sich auf ungefähre Beobachtungen, machte aber von den durchgebogenen Stäben photographische Aufnahmen. Nach Verlauf einiger Stunden wurden die Stäbe mit einem Nörremberg in Bezug auf ihr optisches Verhalten untersucht.

Die Ergebnisse stimmen völlig mit denen Connells überein. Sprünge zeigten sich beim Experimentieren nicht, die Stäbe blieben klar, und es trat auch thatsächlich eine Krümmung der Pinakoidflächen ein.

Müggés Versuche sind auch den Verhältnissen des Gletschers insofern mehr angepaßt, als er höhere Temperaturen als Connel verwendete. Die folgende Tabelle giebt näheren Aufschluß.

	Dimensionen in cm			Belastung	Optische Achsenlage	Dauer	Temperatur	Erfolg
	Länge	Breite	Höhe					
1)	12,3	1,5	0,3	1 kg	horizontal	3 $\frac{1}{2}$ h	-1 $\frac{1}{2}$ ° bis -2°	durchgebogen
2)	12	2	2	5 kg	vertikal	18h	0° bis -1°	keine Durchb.
	"	"	"	"	horizontal	6h	-2° bis -3°	starke Durchb.
	"	"	"	"	"	18h	"	gebroschen
3)	20	2,3	1,9	2 kg	vertikal	48h	-2°	keine Wirkung
	12	"	"	5 kg	horizontal	3h	-1° bis -1 $\frac{1}{2}$ °	gebogen.
	"	"	"	"	"	23h	-1° bis -1 $\frac{1}{2}$ °	gebogen.
	"	"	"	"	"	6h	-1° bis -1 $\frac{1}{2}$ °	stark gebogen.

Überdies beobachtete Mügge thatsächlich oft eine Streifung parallel der Hauptsymmetrieebene, die besonders stark hervortrat, wenn man den Stab senkrecht zum Pinakoid brach. Es gelang sogar, die Hauptachsenlage aus diesen Streifungen festzusetzen. Ob diese Streifung identisch mit der ist, die Emden und Forel beobachteten, ist nicht festzustellen.

Was nun den Druck senkrecht zur Achse anlangt, so ging Mügge weiter als Connel, dessen Versuche in diesem Punkte nicht vollständig waren. Es zeigte sich zwar, daß die Stäbe bei geringer Belastung auch bei Mügge keine Deformation erhielten, aber bei Anwendung von größeren Zügen sich das Bild wesentlich änderte.

Zur Untersuchung wurden optisch vollkommen homogene Stäbe von 1 qcm Querschnitt verwendet, deren Längsflächen parallel zur optischen Achse lagen. Die Belastung betrug über 5 kg; die Schneiden, auf denen die Kristalle auflagen, waren sehr nahe bei einander.

Es zeigte sich nun, daß sich, wenn man Züge bez. Drucke — denn die Aufhängungsweise des Gewichtes bedingt ja einen Druck — senkrecht zur Achse ausübte, Schichten aus dem Kristall herausdrängen ließen, die ungefähr die Breite der Gewichtsschnur hatten. Die optische Achse blieb dabei ihrer ursprünglichen Lage immer parallel. Das herausgedrängte Stück war oft der Basis nach gestreift. Optische Anomalien durch Spannungen und Sprünge traten nicht auf. Nach zwei Stunden zerrifs die Probe, und das herausgedrängte Stück hing an dem Faden, der das Gewicht trug.

Man kann sich also den Bau des Eiskristalles ungefähr durch einen Papierblock versinnbildlichen, dessen einzelne Blätter mit eben festwerdendem Gummi arabicum bestrichen sind. Durch Druck auf die Teile parallel zu den Papierflächen werden eine Anzahl Blätter herausgedrängt. Auf Druck aber senkrecht zu den Schichten, also beim Kristall parallel zur optischen Achse, tritt eine Biegung der Blätter ein.

Es findet sich also beim Eiskristall ein ganz ähnliches Verhalten wie beim Kalkspat, bei dem man künstlich durch Druck Zwillingkristalle erzeugen kann, indem man eine Hälfte längs einer Translationsfläche gleiten läßt.

Um nun zu sehen, ob dieses Herausschieben der einzelnen Schichten von einer Kraft abhängt, die besonders zur optischen Achse gelagert war, wurde ein und derselbe Stab mit der horizontalen optischen Achse, sowohl parallel der einen Seite, als parallel der andern Seite und

auch in der Diagonale des rechteckigen Querschnitts belastet. Nach allen 3 Richtungen trat ein Gleiten ein. Die hinausgeschobenen Stücke konnten durch inverse Kräfte wieder in die ursprüngliche Lage zurückgebracht werden, diese Gleitflächen verhielten sich also wie Individuen eines geordneten Ganzen.

Ein Einfluß der Temperatur auf die Leichtigkeit des Gleitens konnte nicht festgestellt werden.

Dafs Connel dieses Gleiten nicht beobachtet hat, dürfte wohl darauf zurückzuführen sein, dafs er zu geringe Kräfte anwendete. Mügge belastete einen Stab 24 Stunden lang mit 5 kg, ohne die geringste Biegung wahrzunehmen. Erst als die Kraft um 2 kg vermehrt wurde, trat die Erscheinung ein. Beim Auftauen stellte sich heraus, dafs der Stab aus einzelnen, stengligen Individuen bestand, deren optische Achse senkrecht zum Drucke gelegen war.

Es wäre nun wohl am Platze, diese Experimente zu wiederholen. Da man jetzt weiß, welcher Teil der Scherung dem einzelnen Kristall zufällt, kann daraus, falls man Eis von bestimmter Struktur nimmt, geschlossen werden, wie sich die einzelnen Körner an dem Scheren beteiligen. Erst dann könnte vielleicht die theoretische Physik — wegen der verschiedenen Lagen der Achsen unter Zuhilfenahme der Wahrscheinlichkeitsrechnung, — daran denken, das Problem durch mathematische Formulierung angenähert zu bestimmen, wie es etwa die kinetische Gastheorie gethan hat.

Endlich beobachtete Mügge noch eine weitere interessante Erscheinung. Wenn nämlich ein senkrecht zur optischen Achse geschnittener Stab so auf zwei Schneiden, die in Kerben des Eises eingreifen, gelegt wird, so dafs seine optische Achse unter 45° gegen die Vertikale geneigt ist, so zeigt sich, dafs sich die zwischen den Schneiden liegenden Teile des Stabes so drehen, dafs die optische Achse einen geringeren Winkel mit der Vertikalen bildet.

Damit ist sofort gegeben, dafs die Achse der Torsion in der Gleitfläche liegt, wie das auch beim Gyps, Vivianit etc. von Mügge beobachtet wurde. Diese Torsion wird möglich, wenn man annimmt, dafs sich die nach derselben Richtung nämlich senkrecht zur optischen Achse verlaufenden Molekularreihen verhielten wie nicht ausdehnbare und beliebig biegsame Fäden, die sich frei bewegen können, doch so, dafs die Individualität der Gleitflächen gewahrt bleibt.

Das sind im wesentlichen die Resultate Mügges über das Verhalten der Plasticität eines Eiskristalles. Seine Anschauungen münden also in eine Molekularhypothese.

Nun aber entsteht unmittelbar die Frage, wie denn diese Gleitflächen zu stande kommen. Da scheint denn, dafs Buchanan (Nature 35, 36) durch seine Experimente, die selbst nach etwas andrer Richtung liegen, die Bedeutung dieser Schichtenentstehung aufhellen kann. Sie machen es nämlich wahrscheinlich, dafs sich auf den Zwischenschichten zweier solcher Blätter Unreinlichkeiten, vor allem Salze anscheiden und ansammeln. Da aber Salze den Gefrierpunkt erniedrigen, werden neben dem salzfreien Eise, das bei höherer Temperatur gefriert

und jene oben betrachteten Schichten bildet, sich gewisse Flüssigkeitsschichten finden, die eben der Salzgehalt bis zu einem gewissen Grade flüssig erhält. Sinkt aber die Temperatur weiter, so werden diese thatsächlich eine zähflüssige Masse bilden.

Auch ist die Annahme des Salzgehaltes nicht unbegründet. Buchanan hat Gletschereis in dieser Hinsicht untersucht und hat gefunden, dafs es sehr verschiedene Salze enthält und zwar in Mengen, die für obige Erklärung ausreichend sind. Diese Flüssigkeitsschicht mufs aber eine sehr dünne sein, denn sie stört das optische Verhalten nicht; wenn die Dicke der Schichten nicht klein wäre im Verhältnis zur durchschnittlichen Wellenlänge des Lichtes, so müßten sich Reflexionen zeigen, müßten also sichtbar werden.

Buchanan hat festgestellt, dafs der Betrag der Flüssigkeit in Eis, das mit Salzen versetzt ist, ungefähr umgekehrt proportional den Graden unter Null ist. Das Gesetz ist genau richtig in der Nähe des Nullpunktes. Bei gröfseren Salzmenngen wird der Betrag der Flüssigkeit gröfser als das Gesetz angiebt. Das Eis müßte sich also dann noch plastischer zeigen, als wenn es geringe Salzmenngen enthält. Bei einer gewissen Temperatur, die von der Menge und Art der Salze abhängt, wird dann das Wasser allmählich zu einer Menge von kleinen Eisteilchen abwechselnd mit Wasserteilchen von starkem Salzgehalt gefrieren. Da nun die Beweglichkeit dieser Schichten mit höherer Temperatur nachläfst, so mufs sich das Herausdrängen dieser Schichten nach den Experimenten von Mügge als unmöglich erweisen. Plastisch aber bleibt das Eis bei Druck senkrecht zu den Blättchen, wie die Müggesche Hypothese erklärt.

Sind diese Annahmen richtig, so mufs sich zeigen, dafs ein Eiskristall bei höherer Temperatur plastischer wird, dafs ferner ein Eiskristall, der aus salzhaltigem Wasser kristallisiert, sich deformierbarer zeigt, als ein solcher, der, soweit dies möglich ist, aus chemisch reinem Wasser entstanden ist. Wie aber schon oben erwähnt, ist die Frage der Temperaturwirkung nicht zu entscheiden, da die Experimente nur unklar den Einflufs der Temperatur erkennen lassen, obwohl im allgemeinen mit höherer Temperatur die Plasticität gröfser wurde.

Noch gar nicht untersucht ist bis jetzt der Einflufs der chemischen Zusammensetzung des Wassers auf die Plasticität des Eises.

Es drängt sich nun bei derartig grundlegenden Arbeiten die Frage heran, inwieweit sie zur Erkenntnis der Bewegungsvorgänge des Eises verhelfen.

Mügge hält die Ausbeute in Bezug auf diese Frage recht gering, und da man den Einflufs der Temperatur auf die Vorgänge bei den Kristallen noch nicht näher studiert hat, so ist es wohl gewagt, die Bewegung durch die Plasticität des Kornes allein zu erklären.

Vor allem mufs nun das Verhalten zweier Eiskristalle zu einander studiert werden. Exakte Untersuchungen in dieser Richtung fehlen aber wohl noch völlig. Es besteht von physikalischer Seite aus kein Zweifel, dafs aufser diesem plastischen Verhalten des einzelnen Kornes die Erniedrigung des Gefrierpunktes durch Druck und die

damit verbundene teilweise Verflüssigung auf den Zwischenflächen für die Plasticität eine wesentliche Rolle spielt. Eis auf Druck beansprucht wird sicher plastischer sein als Eis auf Zug beansprucht, immerhin aber wird Eis unter Zug auch plastische Erscheinungen zeigen, da sich ja die einzelnen Körner des Eises plastisch erwiesen haben.

Die Translation bei diesen Eiskristallen befördert jedenfalls auch das Ausstossen der Luftbläschen im Eise, und da jeder Kristall das Bestreben hat, bei der Biegung optisch inhomogene Teile hinauszudrängen, so wird dadurch eine Klärung des Kristalls bedingt. Auch kann man leicht ein Wachsen der Körner auf die von Mügge gefundenen Thatsachen zurückführen. Für die Erklärung des Wachsens kann auch eine andere Arbeit nicht unwesentlich sein. Es ist dies eine Untersuchung von O. Lehmann in der Zeitschrift für Physikalische Chemie Bd. 18 pg. 91: „Über das Zusammenfließen von fließendweichen Kristallen.“

Hier wird an verschiedenen Stoffen gezeigt, wie zwei fließendweiche Kristalle sich zu einem einheitlichen Individuum vereinigen, indem sie beim Zusammentreffen ihre Achsen in parallele Stellung bringen, wenn auch die äußere Form der Kristalle völlig verschieden ist. Es ist nun zu vermuten, daß die größeren auf Kosten der kleineren wachsen, denn je größer die Oberfläche eines solchen Kornes ist, desto mehr können sich kleine Körner anlagern.

Ist die Plasticität des einzelnen Kornes in großen Zügen erkannt, so fischt man allerdings noch ziemlich im Trüben, wenn man Antwort auf die Frage: Wie verhält sich Eis als Ganzes in Bezug auf die Plasticität, haben will. Es ergibt sich auch sofort eine Schwierigkeit bei der Feststellung der Plasticität des Eises in exakter Form. Es sind nämlich bei den Körnern, wie Heim, Hagenbach, Emden und Mousson gezeigt haben, die optischen Achsen nicht nach einem bestimmten Gesetze geordnet, wie wohl bisweilen das Gegenteil angenommen wird und neuerdings von Drygalski betont worden ist. Das bedingt ein völlig heterogenes Verhalten des Eises in Bezug auf seine Plasticität. Die Wahrscheinlichkeit, daß zwei nebeneinanderliegende Kristalle beim Drehen und Gleiten unter verschiedenen Bedingungen so zu liegen kommen werden, daß ihre optischen Achsen parallel sind oder einem bestimmten Gesetze folgen, ist ungeheuer gering. Allerdings ist die Schwerkraft als einheitliche Kraft die Triebfeder zur Bewegung, aber sie wird durch die mannigfachen äußeren Bedingungen so abgeändert, daß wir sie nur im großen Zuge: „abwärts, nach unten gerichtet“ wiedererkennen. Das Abwärtsstreben selbst aber geschieht in so verwickelter Weise, daß die Achsenänderung sicher nur einem komplizierten Gesetze folgt. Dadurch aber wird bedingt, daß die Plasticitätsverhältnisse nicht an jeder Stelle dieselben sein werden, da die Plasticität von der Richtung des Druckes zur optischen Kristallachse abhängt. An jeder Stelle wird sich daher die Plasticität ändern, ja, wenn wir das Eis als eine Summe von unabhängigen Körnern auffassen, könnte ein glücklicher Zufall bedingen, daß die

Plasticität in einem größeren Bereiche Null wäre, wenn nämlich die optischen Achsen zufällig in der Druckrichtung lägen.

Auf die Dauer aber ist ein solcher Zustand nicht haltbar, da die Körner sicher aufeinander wirken. Das „Wie“ ist bis heute noch nicht experimentell geklärt. Trotzdem haben sich auf Grund der Kenntnisse über die Eigenschaften des Eises mannigfache Meinungen gebildet.

Mit der Skepsis beginnt Forel (Arch. des sc. ph. et nat. XVIII, 1887). Die Körner haben keine Beziehung zu einander, und damit ihr Zusammenhang keine Bedeutung für die Plasticität. Die Körner wachsen auf Kosten von Infiltrationswasser. Als er aber versuchte, Anilinviolett in die Kapillarspalten des Eises einzuführen, zeigte sich, daß dieses unterfangen, selbst wenn man künstlich einen Abzug bot und das Wasser durch die Kapillarröhrchen zu drücken suchte, ohne Erfolg war. Damit war erwiesen, daß das Wachstum des Kornes nicht allgemein auf Anfrieren von Infiltrationswasser zurückzuführen ist. Die Körner fressen sich gegenseitig auf.

Von denen, die eine Wirkung der Körner aufeinander anerkennen behaupten die einen, es handle sich um eine kristallographische Umlagerung der Moleküle. Der Hauptvertreter dieser Ansicht ist Robert Emden. Damit neigt er zugleich der Ansicht zu, daß die Plasticität des Kornes allein die Plasticität des Eises bedingt. Wesentlicher Stützpunkt dabei ist die Erfahrungsthatsache, daß sich Eis auch im ruhenden Zustande umformt, und daher kein Eis mit der Zeit der Struktur entbehrt (Hagenbach, Arch. des sc. ph. et nat. 23, Emden, Das Gletscherkorn). Wenn nun Emden meint, daß in solchen Fällen, wo zwei Theorien das Gleiche leisten, die einfache den Vorzug hat, so ist dies richtig, wenn beide Theorien den Verhältnissen entsprechen, mit denen sie es zu thun haben. Gletschereis steht unter Druck! Das darf nicht vernachlässigt werden. Sollten zwei Eiskristalle aneinander geprefst wirklich dem so oft wiederholten Tyndallschen Experimente der Eisverflüssigung nicht gehorchen? Für gewisse Teile des Gletschers, an denen der Druck gering ist, oder gar der Zug wirkt, mag Emden wohl im Rechte sein. Sonst aber kann man sich kaum, vor allem vom physikalischen Standpunkte aus, durchgängig mit seiner Anschauung befreunden.

Andere Forscher wie Heim, Forel, Hagenbach, Mousson sind anderer Meinung.

Hagenbach neigt noch mehr zur Ansicht Emdens, aber die Hauptursache der Plasticität sucht er in Vorgängen, die sich zwischen den Verwachsungsflächen der Kristalle abspielen, und bei denen die Regelation wesentlich in Frage kommt. Er stützt sich dabei auf Beobachtungen beim Krümmen von Eisplatten, das auf der konkaven Seite eine Verflüssigung bedingte. Auch Heim hebt hervor, daß eine Regelation der Körner stattfinden kann und zwar völlig unabhängig von der Achsenstellung der Kristalle (Handb. der Gletscherk. pg. 329—332). Forel hat sich der Hagenbachschen Meinung angeschlossen.

Bringen diese Forscher die Regelation zu ihrem Rechte, so macht Mousson noch auf einen anderen Punkt aufmerksam (Arch. des sc. ph. et. nat. 23). Er meint, daß die beim Gleiten und Rollen der Moleküle des Eises erzeugte Wärme eine partielle Verflüssigung bedinge, und schreibt durch diese partielle Verflüssigung dem Eis als Ganzem Plasticität zu. Hagenbach aber macht Front gegen die Annahme, daß durch das Rollen und Gleiten die Wärme erzeugt werden soll, die das Wachstum der Körner begründe. Denn, sagt er, die Körner wachsen auch in der Ruhe, eine Bemerkung, die auch die neuerdings von Drygalski aufgestellte Theorie der Wärmeverfrachtung anzufinden im stande sein dürfte.

Das plastische Verhalten des Gletschereises ist nach dem oben angeführten bedingt durch zwei Faktoren, die sich gegenseitig ergänzen.

1. Jedes Korn ist in der Richtung der optischen Achse bei Druck und Zug plastisch, aber mehr bei Druck als bei Zug. Senkrecht zur optischen Achse läßt sich bei Anwendung von starken Drucken das Eis scheren.
2. Das Eis ist dadurch plastisch, daß es eine Verschiebung der Körner gestattet.

Ein endgültiges Urteil läßt sich nach dieser Richtung kaum geben, und jede Gletschertheorie wäre aus diesem Grunde verfrüht.

Indessen ist nicht unwahrscheinlich, daß wir eine gewisse Bewegungsfreiheit annehmen müssen, auch wenn das Eis nicht unter Druck steht. Die ganze Eismasse erscheint wie eine Menge von Gliedern, die sich in Gelenken bewegen, die Kugelgelenken vergleichbar sind. Jedes Korn ist mit den angrenzenden durch ein solches Gelenk verknüpft, und das Knistern, das Heim auf Gletschern wahrnahm, dürfte wohl auf ein Geräusch zurückzuführen sein, das von den Bewegungen in den Gelenken herrührte. Auf diesen Punkt ist merkwürdigerweise nie Gewicht gelegt worden, und doch liegt er so nahe, wenn man liest, daß Drygalski auf grönländischen Gletschern Löcher von bedeutender Tiefe geschlagen hat, ohne auf gesundes Eis zu kommen.

Diese Bewegungsfreiheit, die natürlich im allgemeinen höchst gering ist, da die Körner aneinanderfrieren, wird erhöht

- α) durch die solare Wirkung, welche die Gletscherkörner löst, so daß sie sich so frei in den Gelenken bewegen lassen, daß man sie sehr leicht mit den Händen aus solchem Eise loslösen kann. Emden empfiehlt ja deshalb gerade die strahlende Wärme zur Herstellung der Körner. Diese Lösung des kristallinen Zusammenhanges dürfte vor allem an der Oberfläche des Gletschers sich dann zeigen, wenn sie von der Sonne beschienen wird. Je tiefer wir aber in den Gletscher eindringen, umsomehr läßt die Wirkung der Sonne nach. Die Erdwärme hat keinen Einfluß, da die strahlende Wärme zur Lösung des Zusammenhanges nötig erscheint, während leitende Wärme eher ein Schmelzen der ganzen Masse hervorbringt. Aber in den untersten Schichten des Gletschers steigert sich der Druck

im allgemeinen, und dieser bedingt dadurch ein Auftauen, bez. eine Regelation der Zwischenflächen der Körner. Daher wird die Bewegungsfreiheit allgemein erhöht:

- β) durch partielle Verflüssigung der Körner an den Grenzflächen. Je mehr sich das Eis, durch die Schwere und die Gestalt des Bettes gezwungen, deformieren muß, desto mehr muß sich der Druck in den Gelenken erhöhen, wenn sie nicht genügend nachgiebig sind. Je größere Veränderungen wir also dem Eise zumuten, desto leichter werden die Grenzflächen flüssig, desto plastischer wird es. Aber auch je höher die über den untersten Schichten lagernde Eismasse ist, desto leichter wird das Eis sich in Formen schmiegen, ja, es muß hier bei genügendem Drucke ein Punkt erreicht werden können, wo gewisse Eismengen ganz flüssig werden und sich so in jede Form schmiegen. Die Unstetigkeiten und Veränderungen des Druckes bedingen in der Wirkung desselben von Ort zu Ort Unterschiede, über die wir noch der näheren Aufklärung bedürfen.

Ob übrigens bei der Verflüssigung der Zwischenflächen allein die Druckwirkung bestimmend ist, scheint zum mindesten fraglich. Jedenfalls erniedrigen Ausscheidungen von Salzen ganz wie der Druck den Gefrierpunkt an den Zwischenflächen der Körner.

- γ) Schliesslich trägt eine Erhöhung der Temperatur überhaupt zur Erhöhung der Plasticität bei, indem sie die unter β) genannten Wirkungen erleichtert, und sie wahrscheinlich auch die Deformationserscheinungen bei einem Kristalle vergrößert.

Hierbei ist stets vorauszusetzen, daß die Kräfte stetig und langsam wirken. Bei momentanen, größeren Kräften bricht auch unter den günstigsten Bedingungen für Plasticität das Eis in kleine Splitter.

Die Freiheit der Bewegung der Kristalle und damit die Plasticität wird vermindert durch Zugwirkungen.

Ein Zug ist eine Druckverminderung im allgemeinen, damit eine Gefrierpunktserhöhung. Eine solche aber muß sowohl das Verflüssigen auf den Grenzflächen der Kristalle erschweren, wie auch die Flüssigkeitsschichten der einzelnen Kristalle leichter zum Gefrieren bringen. Trotzdem zeigt sich das Eis bei Temperaturen, die für den Gletscher in Frage kommen, noch plastisch, nur in geringerem Mafse als bei Beanspruchung auf Druck. Das Heimsche „plastisch auf Druck, spröde auf Zug“ hat also innerhalb gewisser Grenzen seine Berechtigung.

Es scheint also hiernach, daß jeder der oben angeführten Theorien ihr Recht gelassen werden muß. Es liegt ja nahe, daß bei einem so verwickelten Probleme die Verfolgung des kausalen Zusammenhangs kaum auf ein einheitliches Erklärungsprincip führen wird. Das Eis steht unter viel zu mannigfachen und verschiedenen Einwirkungen, als daß es wahrscheinlich sein könnte, daß „eine“ der obigen Theorien in dem Kampfe allein die Palme des Sieges davontragen könnte.

II. Die Bildung der festen Aggregatzustände des Wassers.

Hat sich im 1. Abschnitt gezeigt, daß zur Kenntniss der Eigenschaften des Eises vor allem eine Kenntniss des Gletscherkornes nötig ist, so ist auch ersichtlich, daß man zu einem Studium der Eigenschaften des Gletscherkornes wissen muß, wie dasselbe entsteht. Eine Erörterung der Entstehung des Kornes aber setzt, wenn sie gründlich zu Werke gehen will, über die Entstehung des Schnees Klarheit voraus, denn sie enthält vermutlich bereits in großen Zügen die Grundthatsachen in sich, die auch die Bildung des Firnes und des Eises beherrschen, daß diese nach den verschiedenen Bedingungen, unter denen die Gebilde entstehen, abzuändern sind.

Galt es bis vor kurzem für eine ausgemachte Sache, daß der Schnee eine Vereinigung gefrorener Wassertröpfchen sei, die durch die Kondensation der dampfförmigen Luftfeuchtigkeit entstanden sind, so haben neuerdings zwei deutsche Gelehrte, Hellmann und Neuhaufs, die mikroskopische Photographien von Schneekristallen aufnahmen, geäußert, daß es wahrscheinlich sei, daß man es bei der Schneebildung mit einem unmittelbaren Uebergang vom luftförmigen zum festen Aggregatzustande, also mit einer Sublimation zu thun habe, ähnlich wie beim Salmiak, Jod, Schwefel etc.

Es gelingt nun unter günstigen Bedingungen, diese Meinungen experimentell zu bestätigen.

Der wesentlichste Apparat, der zur Verwendung kommt, ist der bekannte Gefrierapparat, der sich in jeder größeren physikalischen Sammlung befindet, um siedendes Wasser durch seine Verdunstungskälte zum Gefrieren zu bringen.

Von einer Flasche mit weitem Halse, die so weit mit reinem Wasser gefüllt war, daß das Wasser die möglichst größte Oberfläche hatte, führte ein weites Glasrohr luftdicht zu einem mit sehr schwach verdünnter Schwefelsäure gefüllten Gefäß, so daß die Wasserdämpfe über die Schwefelsäurefläche streichen konnten. Wenn Glasröhren durch Gummischläuche verbunden wurden, wurden sie eingefettet und so weit in die Schläuche eingeführt, bis sie sich berührten. Der besseren Dichtung wegen wurden die Schläuche mit Bindfaden umwickelt und so gegen die Glasröhren geprefst. Gummipfropfen, wie auch Glasröhren durch dieselben wurden ebenfalls zur guten Dichtung eingefettet. Das Schwefelsäuregefäß und damit die Leitung bis zum Wassergefäß, die wir der Kürze halber Hauptleitung nennen wollen, steht mit der Luftpumpe in Verbindung. Als solche wurde eine gut dichtende, einstieflige mit vertikalem Kolben verwendet, die zwei Recipienten gleichzeitig bedienen konnten. Jeder derselben konnte aber überdies nach Belieben mit dem Kolben in Verbindung gesetzt werden oder auch von ihm getrennt werden. Die hinlänglich bekannte doppelte Hahnbohrung gestattete überdies, jeden Recipienten getrennt mit der Atmosphäre in Verbindung zu bringen. Das Schwefelsäuregefäß wurde also mit dem einen Verbindungsrohr der Luftpumpe

verbunden, während das andere die noch zu beschreibende „Nebenleitung“ bediente. An der Hauptleitung wurde nämlich an dem Glasrohr zwischen dem Gefäß mit Wasser und dem mit Schwefelsäure ein weiteres Glasrohr angeblasen, das durch einen luftdicht schließenden Hahn mit lichter Öffnung abgeschlossen werden konnte. Dieses Seitenrohr führte bis zur Einmündung in ein zweifach tubuliertes Glasgefäß, dessen Boden mit Bärlappsamen bedeckt war, und das in einer Kältemischung stand. Vom Boden dieses Gefäßes führte schließlich eine Glasröhre zu jenem anderen Verbindungsrohr mit der Luftpumpe. Es wurden nun bei geschlossenem Hahn zwischen Haupt- und Nebenleitung beide Leitungen so weit evakuiert, daß das Wasser anfang zu sieden und zu frieren. Sodann wurde die Hauptleitung abgeschlossen, und allein die Nebenleitung evakuiert. Öffnete man nun den Verbindungshahn zwischen Haupt- und Nebenleitung, so wurden die Wasserdämpfe von niederer Temperatur (die Eisschicht taute inzwischen bald wieder auf) in die luftleere Nebenleitung herübergesogen und sublimierten sich unter günstigen Umständen in Form von weißen Körperchen, die auf dem Bärlappsamen lagen und sich unter dem Vergrößerungsglas als kleine sechseckige Schneesternchen zeigten. Häufig war auch die Glaswandung mit sechseckigen Schneebättchen besetzt. Das Gelingen des Versuches hing indessen von sehr vielen Nebenumständen ab. Zunächst war man überaus abhängig von der Menge von Feuchtigkeit, die in die tubulierte Flasche gesaugt wurde. Der Versuch gelang daher eher, wenn die verwendete Schwefelsäure zur Absorption des Wasserdampfes nicht völlig concentrirt war. Dann mußte man sofort nach dem Einsaugen des Wasserdampfes das tubulierte Gefäß mit der Atmosphäre in Verbindung setzen, was sehr bequem durch die Luftpumpenhähne geschehen konnte. Unterliefs man dies, oder strömte die Luft nicht genügend schnell ein, so fand der inverse Prozess zur Sublimation statt, das gebildete Eis verdunstete sehr schnell. Dann war es dienlich, wenn die tubulierte Flasche unmittelbar vor dem Versuch geschüttelt wurde, damit der Bärlappsamen zum Teil das Gefäß fliegend erfüllte und dadurch günstige Kristallisationspunkte bot. Natürlich mußte dazu die Flasche vorher völlig lufttrocken sein. Endlich war auch die Kältemischung, in der die Flasche stand, von großem Einfluß auf den Erfolg. Nahm man als Kältemischung Schnee (zerkleinertes Eis) mit Viehsalz, was eine Kälte von ungefähr 15° C. erzeugt, so setzte sich nur eine amorphe Eismasse an, und es ist wohl zu vermuten, daß diese amorphe Eismasse durch Gefrieren des condensierten Wassers entstand, da sich das Wasser bei der geringen Temperaturerniedrigung verflüssigte. Kühlte man dagegen nur anfangs mit der obigen Mischung vor und verwendete dann Eis und Schwefelsäure, was eine bedeutend niedrigere Temperatur (im günstigsten Falle 42°) ergibt, so gelang der Versuch. Das Gefäß zeigte bei Beobachtung der oben angegebenen Vorsichtsmaßregeln nach dem Versuche keine Spur von Feuchtigkeit. Aus alledem darf wohl geschlossen werden, daß sich Schneesterne durch Sublimation bilden, während die

amorphen Eismengen durch Gefrieren von condensiertem Dampf entstehen.

Es fragt sich nun, wieweit sich diese Theorie für die wirkliche Bildung des Schnees verwenden läßt. Für den ersten Augenblick scheint der Nutzen recht gering zu sein, wenn man die komplizierten Bedingungen des Experimentes neben den einfachen Naturvorgängen ins Auge faßt. Man muß indes bedenken, daß der größte Teil des experimentellen Apparates nur dazu dient, um reichlich viel Wasserdampf von 0° zu erzeugen und diesen „plötzlich“ größerer Kälte auszusetzen. Die Luft aber enthält bei günstigen Bedingungen massenhaft Wasserdampf von sehr niederer Temperatur. Dazu hat die Natur das mächtige Agens des Windes, der diesen Wasserdampf von 0° und ungefähr 760 mm Quecksilberdruck — der Druck ist sehr wesentlich — in kalte Regionen treibt, deren Temperatur nur wenige Grad unter Null zu liegen braucht, da der Druck im Verhältnis zu dem Drucke im Experiment sehr hoch ist. Bedenkt man nun, daß die neueren Forschungen des Berliner Vereins für Luftschiffahrt eine ziemlich regellose Luftschichtung bis in beträchtliche Höhen und in größeren Höhen eine viel raschere Temperaturabnahme, als man bisher angenommen hatte, nachgewiesen haben, so erhellt leicht, wie thatsächlich unter diesen Umständen eine Wasserdampfsublimation eintreten kann. Auch die neuerdings so vorzüglich studierten Sterngestalten lassen sich vielleicht so erklären:

Ein Dampfbläschen werde in Schichten von niederer Temperatur getrieben. Sobald ein Kristallisationspunkt vorhanden ist — und solche giebt es viele in Form von Staubteilen — gefriert es zu der bekannten sechseckigen Form. Dadurch aber wird die unmittelbare Umgebung wasserdampfarm, denn erstens hat der Kristall das Wasser aufgebraucht, dann aber ist durch das Ausfrieren Wärme frei geworden. Wärmere Luft vermag aber mehr Wasserdampf aufzunehmen als kältere. Die Luft ist daher in unmittelbarer Umgebung des Kristalls weniger gesättigt als die benachbarte, daher wird Dampf von der nächsten Umgebung zuströmen, während der Kristall in kältere Teile getrieben wird. Der Wasserdampf wird wieder in Form eines Blättchens sublimieren und sich — wie das bei jeder Kristallisation stattfindet — an den schon vorhandenen Kristall ansetzen. Die Ecke des Sechseckes, die der Bildung zunächst liegt, bildet jetzt den Kristallisationspunkt; so entsteht die bekannte sechsstrahlige Figur mit den Ästen und Zweigen, die ihre Regelmäßigkeit der Stetigkeit des Vorganges verdankt. Hiernach ist aber unmittelbar klar, daß sehr wohl Seiten des Kristalls hervorragend ausgebildet sein können, teils dadurch, daß sie mit feuchteren Teilen in Berührung kommen, teils dadurch, daß sie mit kälteren Regionen in Berührung stehen als andere Seiten des Sechseckes. In der That ist heute die viel bewunderte Regelmäßigkeit der Schneekristalle als Fiktion anzusehen. Nachdem es gelungen ist, Schneesterne nicht allein nach Zeichnungen aus freier Hand — solche sind schon seit 1555 ausgeführt worden, aber stets wegen der Kürze der Zeit, in der sie gefertigt werden

mufsten, mangelhaft ausgefallen — sondern nach mikroskopischen Photographien in ausreichender, naturgetreuer Vergrößerung zu betrachten, weiß man, daß wohl ein Streben nach Regelmäßigkeit vorhanden ist, das sich in der Konstanz gewisser Winkel äußert, daß die Sterne aber der strengen Symmetrie entbehren. Benachbarte Strahlen sind gewöhnlich gleichmäßig ausgebildet, diametral entgegengesetzte aber meist sehr verschieden, so daß die Sterne in ihren größten Zügen nur eine Symmetrieachse besitzen. Geht man von dem bestausgebildeten Strahle aus, so nimmt die Ausbildung nach beiden Richtungen von diesem Strahle aus bis zu einem Minimum ab. Auch dürfte bei der Feinheit dieser Gebilde der Winddruck nicht ohne wesentlichen Einfluß auf die Form sein.

Recht interessant für die oben gegebene Theorie sind die von Hellmann und Neuhaufs gefundenen Resultate über die Menge der verschiedenen Gestalten der Sterne bei einem Schneefalle. Sie unterscheiden 1. einfache Sterne, 2. Sterne, die durch kleinere Platten und Nadeln verzweigt sind und 3. rein plattenförmige Gebilde, welche letztere wohl nach obigem Experimente als ursprüngliche Gebilde angesehen werden müssen. Sie bilden auch bei allen Photographien das Centrum des Sternes.

Wasserdampf nämlich, der in sehr kalte Regionen schnell getrieben wird, wird in großer Menge sublimieren, und es wird so nur wenig dampfförmiges Wasser bleiben, das in die stark ungesättigte Umgebung des Kristalls eindringt, zumal die Wärme, die nach obiger Erklärung beim Sublimieren des Dampfes entsteht und die Umgebung dadurch ungesättigter erscheinen läßt, hier sofort durch die große Kälte ausgeglichen wird.

Bei Temperaturen tief unter Null müssen also mehr plattenförmige Gebilde als andere Arten zu finden sein. Ist die Kälte dagegen gering, so gefriert weniger Wasserdampf aus, die Umgebung des Kristalls erwärmt sich und erhöht den relativen Mangel an Wasserdampf, da diese Wärme nur schwer ausgeglichen werden kann. Infolgedessen strömt Wasserdampf, der jetzt reichlich vorhanden ist, in das ungesättigte Gebiet ein und sublimiert. Hierbei müssen also Sternformen überwiegen.

Mit diesen theoretischen Resultaten stimmen recht gut die Beobachtungen über die Anzahl der Schneeformen bei einer gewissen Temperatur überein.

Bei mäßiger Kälte finden sich 52 % einfache Sterne, 22 % verzweigte Sterne, 26 % Platten.

Bei starker Kälte finden sich 24 % einfache Sterne, 19 % verzweigte Sterne, 57 % Platten

also im zweiten Falle fast doppelt so viel Platten auf Kosten der einfachen und verzweigten Sterne.

Auch die Beobachtung, daß sich bei geringer Kälte bei unserem Versuche amorphe Eisteile abscheiden, dürfte für die Erklärung der Eisbildung in der Natur nicht ohne Wichtigkeit sein. Sie rechtfertigt nämlich die Ansicht Noellners und Vogels über Hagelbildung.

Dufour erklärt den Hagel bekanntlich dadurch, daß er unter 0° abgekühlte Regentropfen auf Schneekristalle stoßen läßt, was ein Gefrieren der überschmolzenen Wassermasse veranlaßt. Diese so entstandenen Körner treffen mit anderen überschmolzenen Wasserteilen zusammen und überziehen dieselben mit einer schalenförmigen Eishülle von oft beträchtlicher Dicke. Zweifelsohne kommen auf diesem Wege Hagelbildungen vor. Indessen ist zur Überkühlung von Wasser notwendig, daß jede mechanische Erschütterung, vor allem das Fallen von Fremdkörpern in das Wasser vermieden werden muß. Bedenkt man nun, daß die Atmosphäre, wie wir jetzt wissen, mit großen Mengen Staub erfüllt ist, daß jedes Nebelbläschen sich um einen solchen Staubkern ansetzt, so ist es wohl nicht ganz folgerichtig, daß überschmolzenes Wasser erst lange fliegt, ehe es mit Fremdkörpern zusammenstößt. Folgende Theorie dürfte einwandfreier sein:

Bei nicht allzugroßer Kälte wird Wasserdampf sich kondensieren, und dieses Wasser wird gefrieren zu amorphen Eismengen, zu Graupel- und Hagelkörnern. An diese Körner setzen sich nun Eisschalen an, analog wie sich an die sechseckigen Plättchen die Strahlen ansetzen. Die neuesten Photographien von Hagelkörnern von der Wiener und Pariser Station dürften diese Anschauung nicht unwahrscheinlich erscheinen lassen.

Der wesentliche Unterschied der beiden Theorien ist der, daß die Dufoursche zur Überschmelzung geflissentlich allmählich eintretende Kälte, die andere aber dies nicht voraussetzt.

Beides aber ist physikalisch denkbar. Obwohl leider die Statistiken über Hagelfälle noch gering sind, ist man bei weitem über Humboldts Ansicht hinaus, daß Hagel nur in größerer Höhe vorkommt. Man weiß, daß der Hagel in der That, wie das beide Theorien voraussetzen, hauptsächlich durch die Wassermenge in der Luft bedingt wird. Merkwürdig erscheint indes die Thatsache, daß der Hagelfall von lokalen Verhältnissen abhängt. Im Gebirge hagelt es häufiger als in der Ebene, im Hochgebirge seltener als im Mittelgebirge. Nun sind aber Gebirge die Gegenden der Wärmeumkehr. Hagel scheint daher in der Höhe ein wärmeres Gebiet, in der Tiefe Kälte vorauszusetzen, erfährt also schnelle Temperaturänderungen. Die Dufoursche Erklärung brauchte aber gerade allmähliche Änderung. Wenn also wirklich die Wärmeumkehr den Hagel bedingt, was noch weitere statistische Untersuchungen klarzulegen haben, dürfte der anderen Erklärung auch ein Recht einzuräumen sein, ohne daß dadurch die Dufoursche ganz verdrängt würde.

Viele von den oben gegebenen Anschauungen werden nun auch durch anderweitige Beobachtungen, die jeder schon im Zimmer vornehmen kann, nämlich durch Beobachtungen von Eisblumenbildung bestätigt. Zunächst zeigt sich auch hierbei, daß eine Kristallisation nach Art der Schneesterne nur dann entsteht, wenn sich Wasserdampf sublimiert. In einem Zimmer, dessen Luft mit Wasserdampf gesättigt ist, in dem sich also Dampf an kalten Fensterscheiben kondensiert, kommen nur schwer die Eisblumen zur Ausbildung. In Küchen z. B. herrscht vielmehr die amorphe Eisbildung an Fensterscheiben vor. Ganz anders aber

gestaltet sich das Verhältnis in Räumen, die nur geringe Mengen Wasserdampf enthalten z. B. in sogenannten Salons. Hier findet sich, ruhige Luft vorausgesetzt, das schöne Phänomen gut ausgebildet und läßt sich sogar in seiner Entstehung von der Ferne mit dem Opernglase — in der Nähe würde die Wärmestrahlung verderblich sein — recht gut beobachten. Am Rande der Scheibe beginnt die Kristallisation, das Holz als Kristallisationspunkt benutzend. Verhältnismäßig schnell schießen dann pfeilartige Eisgebilde in Sternform hervor, die sich aber langsam verbreiten und immer langsamer wachsen. In kaum einer Minute erreichen diese Anfangsgebilde eine Länge von 4 cm, wachsen aber dann kaum 1—2 cm pro Minute nach der Mitte der Scheibe zu, indem sie die bekannte farnartige Gestalt annehmen. Werden die Spitzen länger, so biegen sie sich oft, und so kommen die mannigfachsten, oft künstlerisch schönen Formen zu stande, vorher bildet sich aber gewöhnlich die Ausgangsstelle um. Die aufsteigende, wenn auch nur wenig wärmere Luft, die immer diese Stelle passiert, reicht aus, um die Individuen dieser Strahlen, die bekanntlich große Ähnlichkeit mit der Gestalt der Schneekristalle haben, zum Teil so weit zu schmelzen, daß sie sich in amorphe Gebilde, die die frühere Form noch in großen Zügen haben, verwandeln können. So entsteht der Eiskern, von dem gewöhnlich die Eisblume ausgeht. Ganz geringe Wärmeunterschiede reichen also aus, um eine Umlagerung der Kristalle zu bewirken — ein für die weiteren Betrachtungen höchst wichtiges Resultat. Werden die Scheiben sofort nach der Eisblumenbildung durch Ätherbefeuchtung der Rückseite der Scheibe künstlich stark abgekühlt, so fehlt diese Umlagerung; die Eisblumen sind am reinsten ausgebildet. Geht aber eine solche Umformung weiter vor sich, so überzieht mit der Zeit eine filzartige Eisschicht, die auf einer amorphen Schicht aufliegt, die ganze Scheibe. Diese filzartige Decke dürfte mit dem Firn eine gewisse Verwandtschaft haben.

Die Erklärung dieser Erscheinung ist ein Analogon zur Erklärung der Schneesterne. An dem Rahmen sublimiert zunächst ein plattenförmiges Eisindividuum. Dieses dient zum Kristallisationspunkt für die übrigen Eisindividuen, die sich nun, nachdem einmal ein Ansatzpunkt da ist, schnell anfügen und zwar an den Ecken der sechseckigen Kristallplatte. Die regelmässige Ausbildung wird gehindert durch die Unebenheit der Scheibe und des Rahmens, trotzdem erkennt man deutlich die Neigung, die Winkel zu wahren. Die benachbarten Wassermengen werden schnell sublimiert, bis allmählich ein Dampf-mangel eintritt. Von nun an geht das Wachstum langsam vor sich, da erst Dampf aus der Umgebung herangezogen werden muß. Die oft beobachteten, dicken amorphen Knoten rühren wohl von Unebenheiten der Scheibe her, an denen sich Wasserdampf sammelt und gefriert. Ein Luftzug stört die Bildung. Es wurde von ferne mittels einer Schlauchleitung in der Nähe der Scheibe Luft eingesogen. Die Kristallisation stockte sichtlich infolge der Wasserdampfentziehung. Aus diesem Grunde müssen die Beobachtungen von ferne durch ein Opernglas bewirkt werden.

Um nun vollständig Einblick in die Ausbildung der Eisblumen zu erhalten, wurde folgendes Experiment veranstaltet:

Die Fensterscheibe eines nur wenig Wasserdampf enthaltenden Raumes, die selbst bis auf 0° abgekühlt, nur schwache Eisblumenansätze in den Ecken zeigte, wurde tags zuvor in der Mitte mit einem Lichte beruht, der Rufsleck aber bis auf eine geringe Spur wieder entfernt. Die zurückbleibende Spur war zum Kristallisationspunkt bestimmt. Mittels eines Gummischlauches, der durch das ungefähr 1 m benachbarte Fenster auf die Außenseite der Scheibe führte, auf der das Experiment vorgenommen werden sollte, und der an dem einen Ende eine zur Spitze ausgezogene Glasröhre trug, am anderen mit einem Blasebalg in Verbindung stand, konnte eine Menge Aether durch Druck auf den Blasebalg auf die Rückseite der Scheibe gebracht werden. War der Aether verspritzt, so reichte dieselbe Vorrichtung aus, um denselben durch Blasen zu verdunsten, also eine Abkühlung der Scheibe und damit die günstigen Bedingungen zur Eissublimation herbeizuführen. Setzte man den Blasebalg in Bewegung, so gelang es bisweilen, regelmässig ausgebildete Sterne zu erzeugen, die eine grosse Aehnlichkeit mit den Schneesternen hatten. An dem immer verhältnissmässig grossen Rufsleck als Kristallisationspunkt mag es wohl gelegen haben, dass oftmals die Eisgebilde ganz unregelmässige Ausbildung zeigten, da sich auf dem Rufsleck mehrere Kristalle zugleich absetzten, die Ausgangspunkte für die Sterne wurden.

Wenden wir uns nach der Betrachtung der Eigenschaften der Schneekristalle der Frage zu: Wie entsteht aus Schnee Firn? So viel über das Gletscherkorn und seine Beziehung zum Firn geschrieben worden ist, so wenig ist über diese Frage bekannt geworden, was umso erstaunlicher ist, da ihre Lösung doch nicht unwesentlich zur Lösung der Fragen über das Gletscherkorn beitragen kann. Die erste Frage, die sich aufdrängt, ist: Unter welchen Bedingungen verfirnt Schnee? Es sind zunächst drei Möglichkeiten denkbar. Erstens kann molekulare Umlagerung, oder zweitens können äussere Einflüsse, oder drittens beide die Verfirnung veranlassen. Will man untersuchen, ob sich Schnee molekular umlagert, so muss man alle äusseren Einflüsse abschliessen, die Schnee verändern können.

Dies wurde folgendermassen erreicht: Frisch gefallener Schnee wurde bei Lufttemperatur unter 0° leicht in Büchsen (Einlegebüchsen mit hermetischem Verschlusse) geschüttet, so dass man lockere Massen hatte, die sehr wohl noch die einzelnen Kristalle erkennen liessen, und zwar nur so viel, dass die oberen Schichten die unteren Kristalle nicht drückten. Zu dem Zwecke liess man lufttrockene Bretter beschneien und erzeugte einen künstlichen Schneefall, indem man die Bretter unter Klopfen über die Büchsen neigte. Die oberen Kristalle rollten herab. Die Fallhöhe wurde gering genommen. Die Büchsen waren absolut lufttrocken und hatten, indem man sie vorher in einem zweiten lufttrockenen Gefässe in Kältemischung gebracht hatte, eine Temperatur, die unter 0° lag. Wurde nun die Büchse mit Schnee gefüllt und luftdicht verschlossen, so wurde

dadurch ein Verdunsten verhindert, und die Feuchtigkeit vom Schnee ferngehalten. Eine solche Büchse wurde an freier Luft dem Wechsel der Temperatur überlassen, eine andere in ein Gefäß, in das Schnee und Wasser gefüllt war, gebracht und durch Gewichte unter dieser Mischung gehalten. Das Gefäß, das seinerseits wieder in einer solchen Mischung stand, um sicher die Temperatur 0° zu halten, froh bald aus. Das Resultat ergeben die Tabellen auf pag. 54 und 55.

Bei den letzten Versuchen I war der Schnee nie völlig geschmolzen, sondern auf einen Eisrest zusammengeschwunden, der stark mit Wasser getränkt war, sich aber längere Zeit als solcher hielt, während in den Versuchsreihen II, bei denen der Schnee längere Zeit als Schnee gehalten wurde, bald völlig schmolz. Berechtigen also diese Versuche nicht zur Annahme einer nur unmolekularen Umlagerung, so liegt doch in ihnen ein Hinweis auf die Neigung zur molekularen Umgestaltung, die aber erst ausgelöst werden muß.

Nimmt man nun eine molekulare Umformung an, die erst ausgelöst werden muß, so bleibt die Wahl zwischen zwei Anschauungen: Entweder löst die Temperaturänderung oder das flüssige Wasser die Umformung aus. Die Entscheidung brachte folgendes Experiment:

Schnee wurde in ein lufttrockenes Gefäß gebracht und längere Zeit in eine Kältemischung gestellt, die aus einem gut durchrührten Gemenge von Schnee und Viehsalz bestand und eine durchschnittliche Temperatur von -6° hatte, so daß auch der Schnee diese Temperatur besaß. Ein Stempel, der in einem Glasgefäß auf dieselbe Temperatur abgekühlt war, um bei Berührung ein Schmelzen des Schnees zu vermeiden, wurde auf den Schnee gesetzt und mit 5 Z . belastet. Nach einiger Zeit entfernte man die Gewichte und wiederholte das Experiment nochmals. Der Schnee wurde stark zusammengedrückt, die Kristalle zerbrachen, aber man konnte nur ganz schwache Spuren der Verfirnung entdecken. Bei einiger Vorsicht gelang es, den Schnee in mehligter Form aus der Büchse zu schütten. Da das Gefäß ungefähr 1 qdm Öffnungsweite hatte, so war pro qcm 25 g, also $\frac{1}{40}$ Atm. Druck. Nahm man den Versuch ohne Kältemischung, aber doch im trockenen Gefäße vor, so zeigte sich sofort eine Verfirnung. Die Temperatur blieb für die eine Reihe von Versuchen auf 0° . Kurz nach der Belastung des Stempels begann die Verfirnung, die bei $0,5^{\circ}$ Wärme nur eines geringen Druckes auf den Stempel bedurfte.

Aus diesen Versuchen dürften wohl folgende Schlüsse zu ziehen erlaubt sein: Da beim ersten Versuche die Kälte -6° und der Druck $\frac{1}{40}$ Atm. betrug, so war ein Schmelzen des Schnees ausgeschlossen, denn bei 1 Atmosphäre beträgt die Gefrierpunkterniedrigung $0,0075^{\circ}$. Für die beiden anderen Versuchsreihen, die bei 0° und über 0° ausgeführt wurden, gilt dies nicht, hier ging bei Druck sicher Schnee vorübergehend in Wasser über. Da bei den Experimenten die Temperatur sich nicht änderte, so dürfte wohl der Übergang des Schnees in Wasser für die Verfirnung wesentlich sein.

Dies konnte nun auch noch durch eine Reihe anderer Versuche bestätigt werden. Die ersten Experimente, Schnee in Büchsen auf-

zubewahren, misflangen. Erst als lufttrockene Gefäße in Anwendung gebracht wurden, zeigte sich, daß man Schnee als solchen aufbewahren kann. Spülte man ein Glasgefäß, das lufttrocken war, und in welches sodann einige Tropfen Eiswasser durch eine Pipette gebracht wurden, mit diesen Tropfen so aus, daß die Seitenwandungen benetzt waren, so zeigte sich, sobald Schnee eingebracht wurde, die Verfirnung an diesen Seiten. Am Glase saßen kleine helle Kristalle, die kleine Löcher in der Schneenumgebung hervorgebracht hatten. Im Innern blieb der Schnee als Schnee noch längere Zeit erhalten, wenn die Büchse auf einer Temperatur von 0° gehalten wurde. Also auch hier waren Teile bei gleicher Temperatur als Schnee erhalten, während die, welche mit dem Wasser in Berührung standen, verfirnt waren. Je feuchter die Büchsen waren, umso tiefer drang die Verfirnung ein. Auch begann bei obigen Versuchen die Verfirnung stets da, wo infolge von Temperaturerhöhung der Schnee schmolz.

Wenn man auf eine Schneedecke, die den obersten Teil einer Schneemenge in einem cylindrischen Glasgefäß bildet, durch ein feines Haarsieb, das auf 0° abgekühlt ist, Wasser von 0° bringt, sinkt die Decke ein, und in kurzer Zeit ist der Schnee völlig verfirnt, die ganze Masse wie ein Schwamm voll Wasser gesogen. Wendet man kein Sieb an, so tröpfelt das Wasser nur auf einen beschränkten Bereich der Decke, oben verfirnt daher wenig, während bei genügender Wassermenge die untere Schicht völlig zu Firn wird. Die Erscheinung wird durch folgenden Versuch verständlich: Tropft man auf Schnee mittels einer Pipette einen Tropfen Wasser von 0° , so schmilzt dieser eine Strecke ein. Die Schneekristalle lösen sich in dem Tropfen, wie man auch sieht, wenn man dieselben auf Wasser von 0° wirft. Legt man den Wirkungsbereich des Tropfens vorsichtig frei, so zeigt sich, daß eine Verfirnung stattgefunden hat, die die Gestalt eines Kegels besitzt, welcher seine Spitze da hat, wo der Tropfen in den Schnee fiel. Das infiltrierte Wasser verbreitet sich also immer mehr im Schnee, je tiefer es eindringt, eine Eigenschaft, auf die wir später zurückkommen werden.

Schließlich konnte die Verfirnung des Schnees unter dem Polariskop beobachtet werden: Die Objektivplatte des eingestellten Nörembergschen Apparates wurde durch Äther, der auf die Rückseite gebracht wurde unter 0° abgekühlt, und auf dieselbe vorsichtig eine verhältnismäßig hohe Schicht Schnee gebracht. Durch einen Wasserzerstäubungsapparat, der, von ferne durch einen Blasebalg angetrieben, Wasserstäubchen von 0° auf den Schnee blies, konnte eine feine Infiltration des Schnees auf der Objektivplatte so lange vorgenommen werden, bis derselbe so weit geschmolzen war, daß man das Polariskop benutzen konnte. Es zeigten sich dann deutlich die Firnindividuen, deren Zwischenschichten mit Wasser getränkt waren; je mehr Wasser und je höher die Temperatur war, umso geringer war die Anzahl der Eisindividuen.

Hiernach und nach dem, was wir sonst noch von den Eigenschaften des Schnees kennen, dürfte es nicht schwer sein, die Verfirnung desselben zu erklären.

Kommt Wasser auf Schnee, so löst dieser sich im Wasser auf, entzieht diesem dabei aber Wärme, so daß eine dem Schneestern äquivalente Wassermenge kristallisieren kann. Daß der Schneestern schmilzt, bedingt aber die Eigenschaft, daß er ein Sublimatprodukt ist, während aus Wasser die Eiskristalle auskristallisieren. Daß das Experiment nicht mit einem Schneestern gelingt, den man auf das Wasser wirft, liegt auf der Hand, denn die beim Schmelzen des Sternes dem Wasser entzogene Wärme, die sich als Abkühlung der Umgebung äußert, kann sich bei der Beweglichkeit der Wassermoleküle in der großen Wassermenge sofort verteilen, und so kann es nicht zum Frieren kommen. Wenn indessen eine Schneemasse mit Wasser begossen wird, so wirken die unter demselben befindlichen Schneemassen wie ein Gradierwerk und zerstreuen das Wasser in kleinere und kleinere Tropfen, wie wir schon oben sahen. Löst sich nun in diesen feinen Tröpfchen ein Stern, so reicht jetzt die entstehende Kälte, die nur schlecht geleitet werden kann, aus, um vielleicht auch ein Teil des Tröpfchens zum Gefrieren zu bringen. Es bildet sich ein Eiskristall, der von Wasser umgeben ist, das entweder bei weiterer Lösung von Schneestern zur Bildung eines neuen Kristalls oder aber zur Vergrößerung des gebildeten Firnkorns beitragen kann, indem es dasselbe mit Eisschichten überzieht. Der schmelzende Schneestern giebt seine Kälte an das ihn umgebende Wasser ab und schmilzt selbst zu Wasser, so daß das erstere ausreichende Kältemengen zum Gefrieren bekommt, und der Fall eintreten kann, daß das Lösungswasser von einer Eishülle umschlossen wird. Vielleicht ist dieses Lösungswasser identisch mit den bei Firnkörnern beobachteten Wassereinschlüssen, die oft ein Bläschen im Innern derselben darstellen. Nicht selten findet man auch Luft und Wasser in solchen Einschlüssen. Strahlt nämlich die Sonne auf einen solchen Kristall, der Wasser von 0° im Innern hat, so wird sich dasselbe erwärmen und zusammenziehen, überdies neues Eis schmelzen; das Schmelzwasser nimmt aber einen kleineren Raum als Eis ein. Es bildet sich dann ein mit Wasser und Wasserdampf erfüllter Raum im Innern des Kristalls.

Mit dieser Anschauung stehen nun die Resultate der obigen Experimente im Einklange. Nimmt man zur Infiltration Wasser von etwas höherer Temperatur als 0° , so wird der Firn nasser und enthält weniger Körner, wie natürlich ist, da die freiwerdende Kälte erst das Wasser auf 0° abkühlt, und so eine geringere Kältemenge zur Kristallisation des Wassers übrigbleibt. Daß dennoch eine zusammenhängende Masse entsteht, liegt wohl an der Adhäsion des Wassers an den Kristallen und daran, daß, um 1 g Wasser von $\frac{1}{2}^{\circ}$ bis auf 0° abzukühlen, nur $\frac{1}{2}$ kleine Kalorie, bei der Verflüssigung von 1 g Schnee aber 80 kleine Kalorien Kälte nötig sind, also verhältnismäßig viel Kälte frei wird.

Es fällt auf, daß Gemenge von Schnee und Wasser nur dann 0° haben, wenn sie dauernd durchrührt werden, aber auch dies ist verständlich. Wirft man Schnee in Wasser, so lösen sich anfangs

nur die Schneeteilchen, die unmittelbar mit dem Wasser in Berührung stehen, also die Teile der Oberfläche der Schneemenge; die entstehende Kälte, die verhältnismäßig gering ist, kühlt nun die die Schneemenge umgebende Wassermasse ab, so daß die Temperaturerniedrigung an verschiedenen Stellen des Gemenges verschieden ist. Wenn man aber das Gemenge durchrührt, so wird der Infiltrationsprozeß beschleunigt, und es löst sich mehr Schnee. Wie viel Wasser der Schnee aufzunehmen im stande ist, zeigt folgender Versuch:

Eine cylindrische, graduierte Röhre trug an dem einen Ende als Boden ein auf 0° abgekühltes Drahtnetz. Füllte man diese mit Schnee und begoß sie bei 0° mit einer abgemessenen Wassermenge, so konnte man das durchlaufende Wasser auffangen und berechnen, wieviel Wasser 100 ccm Schnee aufnahm. Die Resultate giebt folgende Tabelle:

Schneemenge	Infiltrationsmenge	Aufgefangen	Aufgenommen vom Schnee
200 ccm	115 ccm	35 ccm	80 ccm
200 „	150 „	53 „	97 „
400 „	150 „	0 „	150 „
400 „	250 „	74 „	176 „
400 „	250 „	79 „	171 „

Daraus berechnet sich, daß 100 ccm Schnee 43 ccm Wasser von 0° aufnahmen.

Nun ist erklärbar, wie auch Firn beim Schmelzen oder Drücken des Schnees entstehen kann. Beim Schmelzen bildet sich Wasser von 0° , das die Rolle von Infiltrationswasser spielt. Die günstigsten Bedingungen aber bietet Verfirnung durch Druck. Der Druck auf Schnee erniedrigt den Gefrierpunkt. Der Schnee schmilzt, und das gesamte Schmelzwasser muß beim Nachlassen des Druckes gefrieren. Daher ist der Firn, der durch Druck erzeugt wird, verhältnismäßig trocken, ja, wenn der Druck oftmals oder längere Zeit herrscht, ist das entstehende Gebilde kaum von Eis zu unterscheiden, das man nun auch aus Firn erhalten kann, wenn man durch Wärmeentziehung das Wasser zwischen den Firnkörnern zum Gefrieren bringt. Da dieses sich dabei ausdehnt, wird die ganze Masse spröde, eine Eigenschaft, die wir dem Eis zuschreiben. Wenn man das Objektivtischen des Nörembergs nach dem oben erwähnten Experimente durch Verdunsten von Äther auf der Rückseite der Platte abkühlte, konnte das Gefrieren des Wassers zwischen den Körnern beobachtet werden.

Das weitere Verhalten des Eises hat Robert Emden in seiner grundlegenden Arbeit „Über das Gletscherkorn“ bereits experimentell erforscht.

I. Versuchsreihe.

Datum	Lufttemperatur n. C. *)	Gemenge 1	Gemenge 2	1 Büchse im Gemenge 1	2 Büchsen im Gemenge 2 mit gleichem Verlaufe	Büchsen an der Luft
24. Januar 12 ^h mitt.	— 1 (— 4,1)	0°	0°	Schnee	Schnee	Schnee
5 ^h „	— 3,5 (— 3,4)	gefroren	gefroren	„	„	„
8 ^h nachts	— 4,7 (— 4,7)	„	„	„	„	„
10 ^h „	— 6,4 (— 6,5)	„	„	„	„	„
25. Januar 8 ^h früh	— 5,5 (— 5,3)	„	„	„	„	„
12 ^h mitt.	— 1 (— 1,2)	„	„	„	„	„
5 ^h „	— 2,7 (— 2,8)	„	„	„	„	„
8 ^h nachts	— 3,4 (— 3,4)	„	„	„	„	„
10 ^h „	— 3,3 (— 3,4)	„	„	„	„	„
26. Januar 8 ^h früh	+ 0 (+ 0)	„	„	„	„	„
9 ^h „	— 0,3 (— 0,2)	„	„	„	„	„
10 ^h „	— 0,5 (— 0,4)	„	„	„	„	„
11 ^h „	— 0,2 (+ 0)	„	„	„	„	„
12 ^h mitt.	0 (+ 0,3)	Anfang des Tauens 0°		„	„	Anfang von Firnbildung.
1 ^h „	+ 0,3 (+ 0,6)	taut (+ 0,1)	Schneezusatz 0°	Firn beginnt	„	Firnbildung geht fort.
6 ^h „	+ 1,1 (+ 1,5)	(0,8)	„	Firn	„	Firn mit deutlich. Korn.
8 ^h nachts	+ 2,7 (+ 1)	(+ 1)	„	„	„	Geschm. m. eisart. Reste.
10 ^h „	+ 1,4 —	—	—	—	„	—
27. Januar 8 ^h früh	1° —	Wasser 0,8°	Schnee zugesetzt	+ 0,2 Eis mit Wasser	Anfang der Verfirnung	—
12 ^h mitt.	4,3 —	„ + 1°	„	+ 0,3 Wasser	Fortgang der Verfirnung	—
1 ^h „	4,3 —	—	„	+ 0,3 —	Firn	—
4 ^h „	5,6 —	—	„	+ 0,6 —	Geschmolzen z. T.	—

*) Anm. Die in Klammern stehenden Temperaturen gelten für die Büchsen in freier Luft die an einem anderen Orte als die Gefäße standen.

II. Versuchsreihe.

Datum	Lufttemperat.	Gemenge	2 Büchsen im Gemenge (gleicher Verlauf)	1 Büchse in Luft
4. Febr. 8 ^h früh	— 1,5 ^o	0 ^o	Schnee	Schnee
4. Febr. bis 7. Febr.	unter Null	gefroren	"	"
8. " 8 ^h früh	— 0,2 ^o	"	"	"
8. " 10 ^h "	+ 0,1 ^o	Eis weich (Anf. d. Tauens)	"	Am Rande Beginn der Verfirnung
8. " 11 ^h "	+ 1,3 ^o	Eis taut. Schnee zugesetzt	"	Verfirnung schreitet fort
8. " 12 ^h mittags	+ 1,5 ^o	+ 0,4 ^o	Beginn der Verfirnung	Firn
8. " 1 ^h "	+ 2 ^o	+ 0,4 ^o	Firn	"
8. " 3 ^h "	+ 2 ^o	+ 0,5 ^o	Eisiger Firn	Deutliche Körner
9. " 6 ^h "	+ 1,5 ^o	+ 0,8 ^o	Stark geschmolzen	Geschmolzen.

Durch diese Versuche dürfte die Annahme nahe gelegt sein, daß molekulare Umlagerung der Schneekristalle allein die Firnbildung nicht erklären kann, denn wie wäre es dann möglich, daß im Experiment II der Schnee 4½ Tag unter sonst gleichen Umständen Schnee bleibt. Allerdings scheint durch langes Liegen der molekulare Zusammenhang zu einer Umlagerung zu neigen, denn die Verfirnung geschah bei der zweiten Versuchsreihe ungleich schneller als bei der ersten.

Für die Büchsen im Eisgemenge gilt folgende Tabelle:

Versuchsreihe	Maximaltemperatur	Durchschnittstemperatur	Alter des Schnees	Zeit zum Verfirnen
I 1. Gemenge	+ 1 ^o	unter 0 ^o	2 Tage	7 ^h
2. "	+ 0,6 ^o	" 0 ^o	3 "	5 ^h
II	+ 0,5 ^o	" 0	4½ "	3 ^h

Für die Büchsen an der Luft gilt:

I	+ 1 ^o	0 ^o	2 "	8 ^h
II	+ 2 ^o	— 1,8 ^o	4 "	4 ^h

Inhalt.

	Seite
Einleitung	1
I. Eigenschaften des Eises, die das Fließen des Gletschers erklären	1
A. Die geschichtliche Entwicklung der Erkenntnis der Plasticität des Eises ohne Berücksichtigung seiner Struktur . .	5
B. Die Geschichte der Erkenntnis der Plasticität des Eises unter Berücksichtigung seiner Struktur	26
II. Die Bildung der festen Aggregatzustände des Wassers	43
Bildung von Schnee	43
Bildung von Firn	49
Bildung von Eis	53
