

Die Temperatur des Eises im Innern des Gletschers.

Von

Ed. Hagenbach - Bischoff und F.-A. Forel.

Die folgenden zwei in der natürlichen Höhle des Arollagletschers im Kanton Wallis durch Beobachtung festgestellten Tatsachen¹⁾ hatten gezeigt, dass die Temperatur des Gletschereises im Innern des Gletschers unter Null Grad ist.

1. Wenn nach unten schief gerichtete Löcher in das Eis gebohrt und mit Wasser gefüllt wurden, so war nach einigen Tagen die Weite der Oeffnung durch Anfrieren von Wasser vermindert.

2. In einem abgeschlossenen, gegen Luftzug geschützten Teile der Höhle waren die Wände mit treppenförmig gebildeten Eiskrystallen besetzt, die offenbar durch Sublimation des am Boden liegenden Schnees an die kältere Wand entstanden waren.

Da es ziemlich unwahrscheinlich war, dass in der vorgerückten Sommerszeit so nahe bei der Oberfläche noch die Winterkälte sich fühlbar machen sollte, so

¹⁾ F.-A. Forel. *Études glacières*, II. La grotte naturelle du glacier d'Arolla. *Archives de Genève*, T. XVII, pag. 469. (1837.)

kamen wir auf die Vermutung, dass die Erniedrigung unter Null durch Druck hervorgebracht sei, und entschlossen uns, durch möglichst genaue Temperaturbeobachtungen dies zu entscheiden.

Nachdem vorläufige, schon im Sommer 1886 angestellte Beobachtungen uns die Ueberzeugung beigebracht hatten, dass die Temperatur nur einige Hundertel eines Grades unter Null sei, liessen wir bei C. Kramer in Freiburg i. B. Quecksilberthermometer aus Jenenser Glas construieren, welche die Temperatur von etwa -6° bis $+1^{\circ}$ C. umfassten und mit der Kugel etwas über 50 cm. lang waren, so dass die Länge eines Grades etwas mehr als 6 cm. betrug und der Nullpunkt etwa 45 cm. vom untern Ende des Thermometers entfernt war. Drei solcher Thermometer, die wir mit α , β , γ bezeichnen wollen, kamen zur Verwendung; ein vierter zerbrach beim Herausnehmen, da er eingefroren war.

Der Stand der Thermometer, die in $0,01^{\circ}$ C. eingetheilt waren, wurde mit einer in der Hand gehaltenen Lupe bis auf die Genauigkeit eines $0,001^{\circ}$ abgelesen, und die Zahlen wurden nur angenommen, wenn wir beide übereinstimmende Resultate fanden. Noch besser wäre es gewesen, wenn zur Vermeidung der Parallaxe durch eine einfache Vorrichtung die Lupe nur so am Thermometer hätte verschoben werden können, dass das Auge stets genötigt war, senkrecht abzulesen; an Ort und Stelle war es nicht mehr möglich eine solche Vorkehrung zu treffen.

Die Versuche wurden in der Zeit vom 21. bis 27. August 1887 angestellt; eine vorläufige Mittheilung darüber findet sich in den Sitzungsberichten der Pariser Akademie. ¹⁾

¹⁾ Ed. Hagenbach et F.-A. Forel. La température interne des glaciers. C. R. T. CX, pag. 859. 7 Nov. 1887.

Eine Hauptsache war natürlich die genaue Bestimmung des Nullpunktes. Dieselbe wurde so vorgenommen, dass die Thermometer in eine grosse mit frischem Schnee oder fein zerschlagenem Eis und reinem Wasser angefüllte Brenne bis zur Höhe des Nullpunktes eingesetzt wurden. Der Einfluss der Aenderung des Luftdrucks fiel ausser Betracht, da die Bestimmungen des Nullpunktes und die Messungen am gleichen Orte angestellt wurden und die unbedeutenden, höchstens 4 mm. betragenden Aenderungen des Barometerstandes nicht mehr als etwa $0,001^{\circ}$ ausmachen konnten und somit zu vernachlässigen waren. Sehr deutlich zeigte sich jedoch der Einfluss der Neigung des Thermometers; es war desshalb nötig, die Abhängigkeit des Standes des Eispunktes von der Neigung durch Versuche genau festzustellen. Zu diesem Zwecke wurden der Brenne, in welche die Thermometer eingesetzt waren, verschiedene Neigungen gegeben und mit einem Visierinstrument, das zum Mitnehmen auf Reisen bestimmt war, die Winkel gemessen, welche die Richtung der Thermometer mit dem Horizonte machten; es konnte das mit voller Sicherheit bis auf die Genauigkeit eines Grades geschehen. Da aus mechanischen Gründen der innere Druck des Quecksilbers auf die Wände der Kugel dem Sinus des Neigungswinkels proportional sein musste, so durfte man annehmen, dass, wenn y den Stand des Eispunktes und φ den Neigungswinkel bedeutet, die Gleichung stattfindet:

$$y = a + b \cdot \sin \varphi,$$

wo a und b Constante sind.

Von den folgenden Beobachtungen, welche auch die Annahme der obigen Gleichung rechtfertigen, waren die fünf ersten vor der Messung der Gletschertemperatur am 23. August und die zwei letzten nach vollendeter

Messung am 27. August angestellt. Die Neigungswinkel φ sind in Graden und die Thermometerstände in Hundertel Graden Celsius angegeben.

	φ	α	β	γ
1.	90	— 2,0	— 0,5	3,0
2.	53,7	— 0,9	1,3	3,5
3.	28,5	3,0	4,0	6,3
4.	12,5	7,0	6,5	9,5
5.	0,5	8,3	7,9	10,5
6.	90	— 2,0	— 0,4	3,0
7.	27	3,0	4,6	7,0

Die Uebereinstimmung des Standes für 90° vor und nach der Messung zeigt, dass keine Aenderung des Nullpunktes eingetreten war, wie das beim Jenenser Glas zu erwarten war. Aus diesen Messungen wurden nun die Constanten a und b nach der Methode der kleinsten Quadrate abgeleitet. Wenn wir $\sin \varphi$ mit x bezeichnen, so erhalten wir:

$$a = \frac{\sum x \sum xy - \sum y \sum x^2}{(\sum x)^2 - n \cdot \sum x^2}$$

$$b = \frac{\sum x \sum y - n \cdot \sum xy}{(\sum x)^2 - n \cdot \sum x^2};$$

die Berechnung nach diesen Gleichungen gibt aus den obigen Beobachtungszahlen die folgenden drei Gleichungen zur Bestimmung der Lage des Eispunktes für die verschiedenen Neigungen der drei Thermometer:

$$\text{für } \alpha: y = 8,48 - 10,85 \cdot \sin \varphi \pm 0,4$$

$$\text{„ } \beta: y = 8,21 - 9,37 \cdot \sin \varphi \pm 0,1$$

$$\text{„ } \gamma: y = 10,63 - 7,97 \cdot \sin \varphi \pm 0,3$$

Zur Controlle dieser Gleichungen wurden dann auch noch durch graphische Interpolation mit Hülfe der obigen Zahlen die Curven entworfen, welche die Abhängigkeit des Eispunktstandes von der Neigung ausdrücken.

Die Korrekturen der Kalibrierung und der Fundamentaldistanz brauchten nicht ermittelt zu werden; ihr Einfluss war zu unbedeutend für die Bestimmung eines so kleinen Abstandes vom Eispunkt.

Die Messungen der Gletschereistemperatur im Innern der Höhle wurden nun folgender Maassen angestellt. Mit einem zu diesen Beobachtungen nach Art der Metallbohrer hergerichteten und mit Bohrkurbel versehenen Eisbohrer wurden schief nach unten etwa 45 cm. tiefe Löcher von 3 cm. Durchmesser in die Eiswand der Höhle getrieben und bis etwa zur Hälfte mit Petroleum gefüllt; dann wurde ein Thermometer so hineingesetzt, dass die Gegend des Nullpunktes gerade noch heraus sah und darauf das Loch mit Baumwolle und zerstoßenem Eis zugestopft. Schon nach einigen Stunden war der Stand des Thermometers unveränderlich; wir liessen dasselbe jedoch gewöhnlich etwa 24 Stunden eingesenkt. Die Neigung der Thermometer wurde mit dem schon erwähnten Visierinstrument bestimmt.

Die Messungen wurden an 5 Stationen angestellt, welche wir mit *A*, *B*, *C*, *D* und *E* bezeichnen wollen. Die Station *A* war ganz nah beim Eingang der Höhle, wo es noch hell war; die übrigen vier Stationen waren etwa 150 Meter vom Eingang entfernt im Innern der Höhle und zwar *B* und *C* in der trockenen, *D* und *E* in der von einem Bach durchflossenen, erst in diesem Jahre zugänglichen Seitengallerie¹⁾; es war daselbst ganz dunkel und die Ablesung erfolgte beim Licht einer Blendlaterne.

Die folgende Tabelle enthält die Resultate der Messung und die daraus ermittelten Temperaturen. Die

¹⁾ Der Eingang dieser Höhle ist in der Beschreibung der Höhle von Forel (*Études glacières* II. loc. cit.) mit *e* bezeichnet.

Zahlen der Columne I sind erhalten mit den oben abgeleiteten Gleichungen und die damit sehr nah übereinstimmenden Zahlen der Columne II mit den durch graphische Interpolation entworfenen Curven. Die abgelesenen Neigungen sind in Graden, die abgelesenen Thermometerstände in Hundertel Graden Celsius und die ermittelten Temperaturen in Graden Celsius angegeben.

Station	Thermometer	Neigung	Abgelesener Stand	Ermittelte Temperaturen	
				I	II
A	α	22,5	2,0	-0,023	-0,024
B	β	44,5	2,0	-0,002	-0,002
C	γ	43	4,3	-0,009	-0,009
D	β	33,7	2,5	-0,009	-0,008
E	α	23,5	1,1	-0,031	-0,030

Die Bohrlöcher sind mit Petroleum, das beim Eispunkt vollkommen flüssig bleibt, ausgefüllt worden, um das Einfrieren der Thermometer zu verhindern, da dasselbe bei den ersten Beobachtungen störend aufgetreten war; um etwaigen Einwendungen gegen die Anwendung dieser Flüssigkeit zu begegnen, wurde durch besondere sorgfältige Versuche nachgewiesen, dass das Mengen des Eises mit Petroleum keine für unsere Thermometer merkbare Temperaturänderung hervorbrachte.

Genau genommen hätte noch bei den Thermometerablesungen eine Correctur wegen Aenderung des äusseren Druckes vorgenommen werden sollen, da bei der Bestimmung des Eispunktes aussen eine bis nahe zu diesem Punkte reichende Wasserschicht vorhanden war, während im Bohrloch das Thermometer etwa nur zur Hälfte in Petroleum eintauchte. Eine einfache Betrachtung zeigt, dass diese Correction von unbedeutendem Einfluss war. Der Druck der Quecksilbersäule bewirkt nämlich bei den angewandten Neigungen höchstens eine Aenderung von 0°,066; eine bis zum Nullpunkt reichende

Wassersäule bewirkt also höchstens $0^{\circ},005$; und da das Wasser in der Brente nicht bis zum Nullpunkt reichte und die Thermometer etwa bis zur Hälfte in Petroleum eintauchten, so konnte die als Correction anzubringende Grösse im Maximum $0^{\circ},0025$ nicht übersteigen und war wohl in den meisten Fällen noch wesentlich kleiner; das Hauptergebniss würde somit auch durch Berücksichtigung dieses Umstandes nicht wesentlich verändert werden. Es wäre allerdings richtiger gewesen, durch Messen der Höhe des Wassers in der Brente und des Petroleums im Bohrloch diese Grösse zu bestimmen; allein bei den Versuchen in der kalten, nassen und finsternen Höhle war man geneigt, sich auf das absolut Nötige zu beschränken.

Als Resultat unserer Untersuchung ergibt sich somit die Tatsache, dass die Temperatur des Gletschereises im höchsten Fall 3 Hundertel Grad Celsius unter Null war; und es fragt sich nun, wie diese Erscheinung zu erklären ist.

Da es kaum denkbar ist, dass so nah an der Oberfläche, wo fortwährend Schmelzwasser abfließt, die Temperatur des Eises unter dem Schmelzpunkte sich befindet, so müssen wir wohl an eine Erniedrigung des Schmelzpunktes unter den Nullpunkt des Thermometers denken.

Die Vermutung, dass diese Erniedrigung hervorgerufen sei durch die Beimischung eines löslichen Salzes, wird durch die Erwägung beseitigt, dass auch bei unseren Bestimmungen des Nullpunktes das vom Gletscher abfließende Wasser dem Schnee oder zerschlagenen Eis beigemischt wurde. Die Anwesenheit eines löslichen Salzes hätte somit ebensogut die Bestimmung des Nullpunktes beeinflussen müssen. Es bleibt somit nichts übrig als zu sehen, ob sich die Erniedrigung des

Schmelzpunktes nicht aus dem vorhandenen Drucke erklären lässt.

Das Eis in der Höhle am Boden des Gletschers hat natürlich die ganze Last des darüber gelagerten Eises zu tragen. Wäre das Eis eine Flüssigkeit, so würde sich die Grösse des Druckes unmittelbar aus der senkrechten Höhe des Gletschers über der Beobachtungsstelle ableiten lassen. In dem festen von Spalten durchzogenen Eise, welches ungleichförmig auf dem unebenen Boden aufliegt, wird jedoch die Fortpflanzung des Druckes im Inneren etwas unregelmässig vor sich gehen, indem die einzelnen Eispartien bald die Rolle tragender Pfeiler, bald gespannter Bogen und Brücken spielen; es kann deshalb unten am Boden der Druck an verschiedenen Stellen ungleich sein; er wird da verhältnissmässig grösser sein, wo das Eis direkt auf dem Boden aufliegt; immerhin wird man überall etwas Druck erwarten dürfen und der unter Voraussetzung des flüssigen Zustandes berechnete Druck wird im Mittel dem vorhandenen Druck entsprechen.

Aus den Ablesungen eines Aneroidbarometers ergab sich für die Höhe der drückenden Eisschicht 40 bis 50 Meter; was einem Drucke von etwa 4 Atmosphären entspricht.

Nun hat bekanntlich James Thomson¹⁾ aus dem Carnot'schen Lehrsätze geschlossen, dass der Gefrierpunkt des Wassers durch äussern Druck erniedrigt werde und Clausius²⁾ hat gezeigt, dass die gleiche Schluss-

¹⁾ James Thomson. Theoretical considerations on the effect of pressure in lowering the freezing point of water. Trans. Royal Soc. Edinburgh. Vol. XVI, p. 575 (1849).

²⁾ Clausius. Notiz über den Einfluss des Druckes auf das Gefrieren der Flüssigkeiten. Pogg. Ann. Bd. LXXXI, p. 168 (1850). — Mechanische Wärmetheorie. III. Aufl. 1. Bd., p. 168.

folgerung bleibt, auch wenn der von ihm aufgestellte zweite Hauptsatz an die Stelle des ursprünglichen Carnot'schen Lehrsatzes tritt. Die im Laboratorium angestellten Versuche von William Thomson¹⁾ und Mousson²⁾ haben darauf die Richtigkeit dieser theoretischen Betrachtungen bestätigt.

Wir lassen den Gedankengang von J. Thomson und Clausius, der uns die zur Berechnung nötige Gleichung liefert, in übersichtlicher Form folgen.

Wir haben ein Gemenge von Eis und Wasser, das im Ganzen das Volumen v_1 einnimmt; der Druck, unter welchem dieses Gemenge steht, sei p_1 , und seine absolut gerechnete Temperatur sei τ_1 ; wir lassen dasselbe in Gedanken die folgenden vier Vorgänge durchmachen.

Zur Veranschaulichung dient die auf Seite 644 stehende Figur, in welcher die Volumina als Abscissen und die dazu gehörigen Drucke als Ordinaten abgetragen sind.

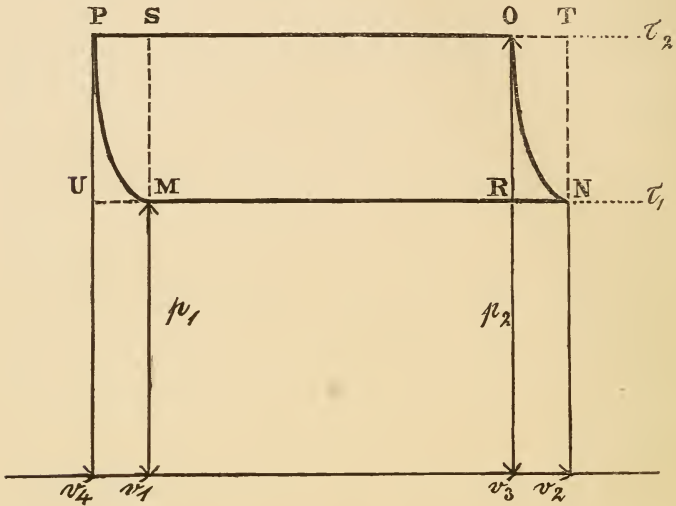
1. Das Gemenge wird in Verbindung gebracht mit einem Körper A , dessen Temperatur unendlich wenig unter τ_1 steht und damit so lange in Verbindung gelassen, bis durch Entziehung der Wärmemenge Q_1 eine Masseneinheit Wasser in Eis übergeführt und dadurch bei constantem Druck und constanter Temperatur das Volumen v_1 auf v_2 gestiegen ist.

2. Der Druck wird adiabatisch, d. h. in einer für Wärme undurchdringlichen Hülle von p_1 auf p_2 gestei-

¹⁾ W. Thomson. The effect of pressure in lowering the freezing point of water experimently demonstrated. Phil. Mag. (3). Vol. XXXVII, p. 123 (1856). — Mathem. and physical papers. Vol. I, p. 165.

²⁾ Mousson. Einige Thatsachen betreffend das Schmelzen und Gefrieren des Wassers. Pogg. Ann. Vol. CV, p. 161 (1858).

gert; in Folge dessen wird eine kleine Menge Eis in Wasser verwandelt, das Volumen von v_2 auf v_3 vermindert und die Temperatur von τ_1 auf τ_2 durch den Verbrauch der Schmelzwärme erniedrigt.



3. Das Gemenge wird in Verbindung gebracht mit einem Körper B , dessen Temperatur unendlich wenig über τ_2 steht und damit so lange in Verbindung gelassen, bis durch Mitteilung der Wärmemenge Q_2 so viel Eis geschmolzen ist, dass das Volumen von v_3 auf v_4 zurückgeht. v_4 ist durch die Bedingung gegeben, dass der Vorgang 4 den Anfangszustand wieder herstellt.

4. Der Druck wird adiabatisch von p_2 auf p_1 vermindert; in Folge dessen bildet sich etwas Eis, das Volumen geht von v_4 auf v_1 und die Temperatur steigt in Folge der frei werdenden Wärme auf τ_1 .

Der Anfangszustand ist wieder erreicht; wir haben somit einen geschlossenen Kreisprocess, und eine ein-

fache Betrachtung zeigt, dass derselbe auch umkehrbar ist. So wie wir ihn durchlaufen haben, wird Arbeit verbraucht und dadurch die Wärmemenge $Q_1 - Q_2$ erzeugt, zugleich geht die Wärmemenge Q_1 von dem kältern Körper B an den wärmern Körper A über. Für das Verhältniss dieser Wärmemengen haben wir nach dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie:

$$\frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{\tau_1}{\tau_1 - \tau_2}.$$

Nehmen wir für p_1 den Normalatmosphärendruck, so ist τ_1 die Temperatur des Schmelzpunktes beim Normaldruck und Q_1 die Schmelzungswärme.

$Q_1 - Q_2$ ist die durch Arbeit erzeugte Wärme. Bedeutet also W die verbrauchte Arbeit und E das mechanische Aequivalent der Wärme, so ist

$$Q_1 - Q_2 = \frac{W}{E}.$$

Die verbrauchte Arbeit W wird dargestellt durch die Fläche $MNOP$; da die Flächen MUP und NRO klein sind im Vergleich zur ganzen Fläche und ausserdem unter sich nahezu gleich, so kann statt der Fläche $MNOP$ die Fläche $UROP$ oder $MNTS$ genommen werden; und wir haben somit:

$$W = (v_2 - v_1) \cdot (p_2 - p_1);$$

aus dieser Gleichung in Verbindung mit den vorhergehenden folgt:

$$\tau_1 - \tau_2 = \tau_1 \cdot \frac{(v_2 - v_1) \cdot (p_2 - p_1)}{Q_1 E};$$

es ist somit die Temperaturerniedrigung der Druckvermehrung proportional.

Wir führen in diese Gleichung die Zahlenwerte ein und nehmen dabei als Längeneinheit den Decimeter, als Gewichtseinheit das Kilogramm und setzen somit:

die absolute Temperatur des Thermometernullpunktes . . .	$t_1 = 273^{\circ} \text{ C.}$
die Volumenzunahme durch Ge- frieren von 1 kg. Wasser . . .	$v_2 - v_1 = 0,09 \text{ dm}^3.$
die Druckzunahme auf den dm^2 . für 1 Atmosphäre	$p_2 - p_1 = 103 \text{ kg.}$
die Schmelzwärme für 1 kg. Eis	$Q_1 = 80 \text{ Calorien}$
die einer Calorie äquivalente Arbeit	$E = 424 \text{ kg.m.}$ oder $= 4240 \text{ kg. dm.}$

Dies gibt durch Ausrechnung $0^{\circ},0075 \text{ C.}$ für die Erniedrigung des Gefrierpunktes bei der Steigerung des Druckes von einer auf zwei Atmosphären, und somit für einen Druck von 4 Atmosphären eine Temperaturerniedrigung von $0^{\circ},03 \text{ C.}$

Da die von uns im Gletschereis beobachteten Temperaturen nirgends wesentlich unter diese Zahl gehen, so dürfen wir behaupten, dass die Temperatur unter Null im Innern des Gletschers sich vollkommen aus der Erniedrigung des Schmelzpunktes durch Druck erklären lässt, und können desshalb annehmen, dass trotz der von uns nachgewiesenen Temperatur unter Null im Sommer die Gesamtmasse des Gletschereises wenigstens am untern Ende des Gletschers sich auf dem Schmelzpunkte befindet.

Weitere Untersuchungen über die Temperatur des Gletschereises wären sehr erwünscht; es könnten dazu vielleicht Thermometer mit Schwefelkohlenstoff nach W. Thomson oder auch Thermoelemente verwendet werden. Untersuchungen zu verschiedener Jahreszeit könnten über das Eindringen der Winterkälte, und gleichzeitige Beobachtungen zur Sommerszeit an verschiedenen Stellen über die Verteilung des Druckes im Gletscher wertvolle Aufschlüsse geben.



ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Verhandlungen der Naturforschenden Gesellschaft zu Basel](#)

Jahr/Year: 1890

Band/Volume: [8_1890](#)

Autor(en)/Author(s): Hagenbach-Bischoff Eduard, Forel F.-A.

Artikel/Article: [Die Temperatur des Eises im Innern des Gletschers 635-646](#)