Bestimmung des absoluten Wärmeleitungsvermögens einiger Gesteine.

Von

Gabriele Stadler.

Zuverlässige Untersuchungen über die absoluten Werthe der Wärmeleitungsfähigkeit der Gesteine sind von hohem Interesse, sowohl für die allgemeine Physik der Erde als auch für verschiedene Zweige der Wärmetheorie. Dennoch existiren nur sehr wenige Arbeiten, die sich mit der Ermittlung dieser Grösse befassten, und sie lieferten nicht immer die auf diesem Gebiete wünschenswerthe Genauigkeit der Resultate.

Desswegen stellten sich die folgenden Untersuchungen das Ziel, die absoluten Werthe des Wärmeleitungsvermögens einer beträchtlichen Reihe möglichst verschiedener Gesteine zu bestimmen, und zwar mittelst eines Verfahrens, das Herr Professor H. F. Weber in den physikalischen Uebungen seines Laboratoriums seit 1878 zur Bestimmung des Wärmeleitungsvermögens schlecht leitender fester Körper anwenden lässt.

Der vorliegende Bericht gibt in einem ersten Theile die Entwicklung der benutzten Methode, in einem zweiten einen Ueberblick über die erhaltenen Messungsresultate.

Darstellung der benutzten Methode.

Ein homogener fester Körper mit verhältnissmässig kleinem Wärmeleitungsvermögen (es sei kleiner als 1, Gramm, Centimeter, Minute und 1° C. als Maasseinheiten vorausgesetzt) liege in Form eines Würfels mit der Kantenlänge l vor.

Er sei anfänglich auf eine allen seinen Massentheilchen gemeinsame Temperatur, u_0, erwärmt und werde von einem bestimmten Zeitmomente an — den wir als Zeitmoment 0 wählen wollen — längs seiner ganzen Oberfläche dauernd auf eine gewisse Temperatur, die als Temperatur 0° angenommen werden mag, abgekühlt.

Vom Momente der Kühlung an beginnt die Bewegung der Wärme von jedem Punkte des Würfels nach seiner Oberfläche hin und die Temperatur sinkt in jedem Punkte von ihrem Anfangswerthe, u_0, in stetiger Weise auf 0° herab.

Eine nähere Analyse dieser Wärmebewegung ergibt, dass der absolute Werth des Wärmeleitungsvermögens der Würfelsubstanz aus dem in einem bestimmten Punkte des Würfels beobachteten zeitlichen Gange der Temperatur sich ableiten lässt, sobald drei weitere Constante des Würfels: Kantenlänge, Dichte und specifische Wärme, ermittelt worden sind.

Zur Bestimmung der Temperatur u zu irgend einer Zeit t in irgend einem Orte des der Kühlung unterzogenen, homogenen Würfels mit der Kantenlänge l, der Dichte ϱ, der specifischen Wärme c und der absoluten Wärmeleitungsfähigkeit k dienen die folgenden Gleichungen:

1) Für jeden Ort (x, y, z) des Würfels und für jeden Zeitmoment der Kühlung gilt die Gleichung

$$\varrho\, c \frac{d\,u}{dt} = k \left\{ \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right\} \quad \ldots . \quad \text{(I)}$$

2) Wird der Ursprung des Coordinatensystems im Mittelpunkte des Würfels gedacht, so gelten für die ganze Zeit der Abkühlung die Bedingungsgleichungen:

$$\left.\begin{array}{ll} \text{für} & x = \pm \frac{l}{2},\; y = y,\; z = z \\ \text{»} & y = \pm \frac{l}{2},\; x = x,\; z = z \\ \text{»} & z = \pm \frac{l}{2},\; x = x,\; y = y \end{array}\right\} \begin{array}{l} \text{ist } u = 0 \\ \text{für jedes } t \end{array} \quad \ldots \quad \text{(II)}$$

3) Zu Beginn der Abkühlung, also zur Zeit $t = 0$ ist für die ganze Masse des Würfels die Temperatur $u = u_0$; es ist somit die Gleichung zu erfüllen:

$$\text{für } t = 0 \text{ ist } \mu = 0 \text{ für jedes } x, y, z \quad \ldots \text{(III)}$$

Eine für die erstrebten experimentellen Ziele brauchbare Lösung der Gleichungen I, II und III lässt sich nach den von Fourier angegebenen Methoden der Behandlung von Wärmeleitungsproblemen in der folgenden Form darstellen:

$$u = \left(\frac{4}{\pi}\right)^3 u_0 \sum_0^\infty \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{2n+1}{l} \pi x\right) \times$$

$$\times e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho c} t} \cdot \sum_0^\infty \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{2n+1}{l} \pi y\right) \times$$

$$\times e^{-\frac{(2n+1)^2 \pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho c} t} \cdot \sum_0^\infty \frac{(-1)^n}{2n+1} \cos\left(\frac{2n+1}{l} \pi x\right) e^{-\frac{(2n+1)^2}{l^2} \frac{k}{\varrho c} \cdot t}$$

Um mit Hilfe dieses Ausdruckes von u eine möglichst directe Bestimmungsmethode zur Ermittlung der Leitungsfähigkeit k zu erhalten, soll angenommen werden:

es möge der zeitliche Verlauf der Temperatur nicht in irgend einem Punkte des Würfels, sondern lediglich im Punkte $x = y = z = \frac{l}{6}$ zur Beobachtung kommen.

Dann fällt das zweite, fünfte, achte . . . Glied in jeder der drei oben verzeichneten unendlichen Reihen fort, und die dritten, vierten . . . Glieder dieser Reihen haben die Form:

$$-\frac{1}{5}\cos\left(\frac{5}{6}\pi\right) e^{-\frac{25\pi^2}{l^2}\cdot\frac{k}{\varrho c}\cdot t}$$

$$+\frac{1}{7}\cos\left(\frac{7}{6}\pi\right) e^{-\frac{49\pi^2}{l^2}\cdot\frac{k}{\varrho c}\cdot t}$$

. . . .

. . . .

Nach verhältnissmässig sehr kurzer Zeit ist also der Werth jeder der obigen unendlichen Reihen mit grosser Annäherung darstellbar durch ihr erstes Glied, so dass schon nach kurzer Zeit, t', seit Beginn der Kühlung die Temperatur im Orte $x = y = z = \frac{l}{6}$ gegeben ist durch die Beziehung:

$$u = \left(\frac{4}{\pi}\right)^3 \cdot u_0 \cos^3\left(\frac{\pi}{6}\right) \cdot e^{-\frac{3\pi^2}{l^2}\cdot\frac{k}{\varrho c}\cdot t}$$

Die Zeit t' ist durch die Gleichung bestimmt:

$$\frac{1}{5}\cos\left(\frac{5}{6}\pi\right) e^{-\frac{25\pi^2}{l^2}\cdot\frac{k}{\varrho c}\cdot t'} = \text{verschwindend klein gegen } 1.$$

Der Ausdruck für die Temperatur

$$u = \left(\frac{4}{\pi}\right)^3 u_0 \cos^3\left(\frac{\pi}{6}\right) e^{-\frac{3\,\pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho\, c} \cdot t}$$

erlaubt aber, eine Form für die Constante der Wärmeleitung k zu gewinnen, welche der physikalischen Messung leicht zugänglich ist. Ermittelt man nämlich die Temperaturen u_1 und u_2 im Punkte $x = y = z = \frac{l}{6}$ für zwei um das Zeitintervall $\varDelta\, t$ verschiedene Momente der Kühlung, so gilt:

$$u_1 = C\, e^{-\frac{3\,\pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho\, c} \cdot t}, \quad \text{wo} \quad C = \left(\frac{4}{\pi}\right)^3 u_0 \cos^3\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad \text{ist}$$

und
$$u_2 = C\, e^{-\frac{3\,\pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho\, c} \cdot \left(t + \varDelta\, t\right)}$$

also
$$\frac{u_1}{u_2} = e^{\frac{3\,\pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho\, c} \cdot \varDelta\, t}$$

Daraus folgt
$$k = \frac{\varrho\, c\, l^2}{3\,\pi^2} \cdot \frac{1}{\varDelta\, t} \cdot lg\left(\frac{u_1}{u_2}\right).$$

Die Grösse $\varDelta\, t$ möge die Zeiteinheit, eine Minute, sein; und es möge das Verhältniss $\frac{u_1}{u_2}$ das »Decrement der Temperatur«, sein natürlicher Logarithmus, $lg\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$, das »logarithmische Decrement der Temperatur« genannt werden.

Der absolute Werth von k wird also nach dieser Methode durch die Beobachtung der Dichte, specifischen Wärme, Kantenlänge des Würfels und des Decrementes der Temperatur erhalten.

Der experimentelle Theil der Untersuchungen.

Bevor wir angeben, wie die Grössen ϱ, c, l und $lg\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$ ermittelt wurden, soll das Verfahren besprochen werden, das wir anwandten, die ganze Oberfläche des zu untersuchenden Würfels für die Dauer der Kühlung auf 0° Temperatur zu erhalten.

Der abzukühlende Würfel war in der Mitte eines kubischen, oben offenen Gefässes aus Eisenblech aufgehängt und befand sich in dieser Lage mit jeder seiner Flächen circa 3 ctm. von der Oeffnung einer normal gegen die Mitte der betreffenden Würfelfläche gerichteten Röhre. Fünf dieser ungefähr $1^1/_2$ ctm. weiten Röhren führten von den Mitten der Wände des Kühlgefässes normal zu den Wänden nach innen, die sechste, zweimal rechtwinklig gebogene Röhre entsprang einer Seitenwand des Gefässes und diente auch zur Befestigung der Enden des dünnen Fadens, an dem der Würfel aufgehängt war. Die sechs Röhren communicirten mit einem weiteren, an dem Kühlgefässe seitlich angebrachten Rohre, das durch einen 3 ctm. weiten Gummischlauch mit dem 5 ctm. weiten Rohre der Wasserleitung verbunden war.

Bei vollkommen geöffnetem Hahne der Wasserleitung wurden auf diese Weise etwa 3 Liter Wasser pro Secunde gleichmässig über die ganze Würfeloberfläche gespült.

So war es leicht möglich, drei Versuchsbedingungen zu verwirklichen, die zur Erreichung exacter Messungsresultate unerlässlich sind:

1) Die Constanz der Temperatur des zur Kühlung verwandten Wassers.

Erfahrungsgemäss ist die Temperatur des Wassers grosser Wasserleitungen nur seltenen und sehr geringen

Schwankungen unterworfen, sobald nur das Verfahren benutzt wird, das Wasser nicht sofort nach Oeffnung des Hahnes der Wasserleitung zu brauchen, sondern erst nach Ablauf jener Zeit, die nöthig ist, um das in den Röhren des Hauses vor dem Oeffnen stagnirende Wasser vollständig abzulassen. Für unsere Versuche, die nur Zeiträume von wenigen Minuten erforderten, war die Temperatur des Wassers immer vollkommen constant.

2) Die momentane und dauernde Abkühlung der Würfeloberfläche auf die Temperatur des Kühlwassers.

Und endlich noch die vollkommen gleichmässige Abkühlung der gesammten Oberfläche des Würfels.

Ueber die Genauigkeit, welche das bei unseren Untersuchungen angewandte Verfahren der Kühlung bietet, geben besondere, am Schlusse des Berichtes angeführte Versuchsreihen Auskunft.

Ermittlung des logarithmischen Decrementes der Temperatur auf thermoelektrischem Wege.

Die Form des Ausdruckes für das Decrement der Temperatur lässt erkennen, dass jede relative Messung der Temperatur die Grösse dieses Decrementes zu ermitteln gestattet. Es ist also hier die Anwendung der thermoelektrischen Bestimmung der Temperatur zulässig. Zur Erreichung exacter Resultate war sogar die Anwendung dieser Temperaturbestimmungsmethode geboten, denn die zu messenden Temperaturen sind bei nicht allzu grossen Würfeldimensionen rasch veränderliche.

Wir benutzten bei unseren thermoelektrischen Temperaturmessungen Thermoelemente aus einem Kupfer- und einem Neusilberdraht. Die Drähte des Elementes waren durch Umspinnung und Paraffinüberzug sorgfältig nach aussen isolirt und ihre Dicke betrug nur etwa $^1/_4$ mm, so dass durch dieselben keine erhebliche Wärmeableitung stattfinden konnte. Die eine Löthstelle des verwendeten Thermoelementes war durch einen feinen Canal in den Würfel eingelassen und im Punkte $x = y = z = \frac{l}{6}$ mit Gyps und Kitt befestigt.

Die zweite Löthstelle befand sich während eines Versuches im Wasser des Kühlgefässes.

Von den benutzten Thermoelementen war in einer besonderen Versuchsreihe nachgewiesen worden, dass ihre thermoelektromotorische Kraft innerhalb des Temperaturintervalles 0° bis 40° so gut wie vollkommen proportional der Temperaturdifferenz der Löthstellen war, dass mithin die Stärke des thermoelektrischen Stromes bei den in Rede stehenden Versuchen die Form hatte: $i = A u$, wo A eine Constante bedeutet. An die Stelle des Temperaturverhältnisses, $\frac{u_1}{u_2}$, konnte also auch das Verhältniss der Stromstärken, $\frac{i_1}{i_2}$, gesetzt werden.

Die Messung der Stromstärke i geschah mittelst eines sehr empfindlichen Galvanometers mit vier Drahtrollen und einem kurzen astatischen Nadelpaar, dessen Ausschläge mittelst Fernrohr, Spiegel und Scala gemessen wurden.

Die Bewegung des astatischen Nadelpaares war eine fast vollkommen aperiodische, so dass, abgesehen von den ersten 40 Secunden nach der Schliessung des Galvanometerkreises, der momentane Ausschlag des Magnets als richtiges Maass für die momentan vorhandene Stromstärke angesehen werden durfte.

Die Ausführung der Versuche zur Ermittlung des logarithmischen Decrementes der Temperatur geschah in folgender Weise:

Nachdem der auf sein Wärmeleitungsvermögen zu prüfende Würfel etwa 15′ in einem Wasserbade von 30° bis höchstens 40° erwärmt worden war, wurde er thunlichst rasch in das leere Kühlgefäss gehängt. Im Momente der Aufhängung wurde der Hahn der Wasserleitung geöffnet und im selben Momente auch der zur Messung dienende Leitungskreis geschlossen. Circa 1′ nach dem Stromschlusse erfolgte die erste Ablesung am Fernrohr; die weiteren Ablesungen geschahen von 15″ zu 15″. Sie ergaben im Scalenintervall 300 mm bis 50 mm eine Reihe von Ausschlägen, welche, reducirt auf die Tangente des Ausschlages, relative Maasse für die in den Ablesungsmomenten vorhandenen Stromstärken waren. Da in unserem Falle nur das Verhältniss je zweier Tangenten, respective Stromstärken in Betracht kömmt, durften wir bei Anwendung der bekannten Reductionsformel

$$tg\, u = \frac{1}{2\,D}\left\{s - \frac{s^3}{4\,D^2}\right\} \quad \left(\begin{matrix} s = \text{Ablenkung d. Magnets in Scalentheil.} \\ D = \text{Distanz Spiegel — Scala} \end{matrix}\right)$$

den Factor $\frac{1}{2\,D}$ aus der Rechnung fortlassen.

Bezeichnen wir die um $\frac{s^3}{4\,D^2}$ verminderten Ausschläge mit σ_1, σ_2, σ_3, . . . so sind die Grössen $lg\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_5}\right)$, $lg\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_6}\right)$, $lg\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_7}\right)$ . . . . als Ausdrücke für das zu bestimmende logarithmische Decrement der Temperatur zu betrachten. Zu Beginn und am Schlusse jedes Versuches wurde die Ruhelage des Galvanometermagnetes abgelesen. Sie zeigte sich in der Regel vollkommen constant. In den Fällen, wo sie sich während der wenigen Minuten des Versuches ein wenig abänderte, wurde ihr momentaner, irgend einer Beobachtungszeit entsprechender Werth in bekannter Weise durch Interpolation gefunden.

Es konnte auch mit Sicherheit störenden Einflüssen Rechnung getragen werden, die durch Hervorrufen kleiner thermoelektromotorischer Kräfte in den einzelnen Theilen der Leitung die Genauigkdit beeinträchtigt hätten: man beobachtete den kleinen Ausschlag, der nach erfolgter vollständiger Abkühlung des Würfels dauernd bestehen blieb und brachte ihn als Correction an den beobachteten Ausschlägen an.

Für jedes Gestein wurden auf diese Weise 10 Versuchsreihen aufgestellt und die Mittelwerthe aus je 3 respective 4 Reihen zur Berechnung der Constanten k benutzt.

Bestimmung der specifischen Wärme.

Die specifische Wärme der zu prüfenden Gesteine wurde mittelst des Wassercalorimeters auf folgende Art bestimmt. Eine Masse von etwa 50 Gramm des in kleine Stückchen zertheilten Gesteines wurde in einer Heizflasche während 30′ der Temperatur des siedenden Wassers ausgesetzt.

Die benutzte Heizflasche war ein nach aussen mit Flanell überkleidetes Hohlgefäss, das durch zwei coaxial in einander geschobene Kupfercylinder gebildet wurde. Der innere, etwa 2 ctm. weite Cylinder diente als Recipient der Substanz. Der äussere Cylinder war mit drei Dampfleitungsröhren versehen, von denen zwei kurz vor der Mitte des Recipienten von diametralen Seiten her mündeten, während die dritte Röhre in den Boden des äusseren Cylinders eingesetzt war. Die beiden ersten Röhren waren bestimmt, Dämpfe siedenden Wassers, die in einem seitlich aufgestellten Heizapparat entwickelt wurden, in den Hohlraum der Heizflasche eintreten zu lassen, durch die dritte Röhre konnte der Dampf, nachdem er die Innenwände der Flasche umspült hatte, wieder ausströmen.

Nach geschehener Erwärmung der Substanz, also mit Ablauf der 30. Minute, erfolgte das Einwerfen der Substanz in das Calorimeter, ein Gefäss aus dünnem Kupferblech, dessen Wasserfüllung gewöhnlich etwa 280 gr betrug.

Kurz vor dem Einbringen der Substanz in das Calorimeter wurde der Gang der Calorimetertemperatur sorgfältig notirt; nach dem Einbringen der Substanz erfolgten die Thermometerablesungen von 15″ zu 15″ und wurden so lange fortgesetzt, bis der Abfall der Temperatur mit constanter Geschwindigkeit erfolgte.

Bedeutet t_1 die Anfangstemperatur des Calorimeters,
T die Anfangstemperatur der Substanz,
t_n die der Substanz und Wasserfüllung gemeinsame Endtemperatur,
m die Masse der Substanz,
$\Sigma\,(M\,C)$ den Wasserwerth des gefüllten Calorimeters,
$\Sigma\,(w)$ die Summe aller Wärmeverluste des Calorimeters nach aussen,

so gilt als Ausdruck für die specifische Wärme

$$c = \frac{\Sigma\,(M\,C)\,(t_n - t_1) + \Sigma\,(w)}{m\,(T - t_n)}$$

Zur Bestimmung der mit $\Sigma\,(w)$ bezeichneten Grösse wurde folgender Weg eingeschlagen.

Der Wärmeverlust, welchen das Calorimeter durch Ausstrahlung und Wärmefortführung während der Zeit Δ_z erleidet, lässt sich für kleine Temperaturen und kleine Temperaturdifferenzen ausdrücken durch $h\,(t - t_1)\,\Delta_z$, wo t die mittlere, dem Zeitintervall Δ_z entsprechende

Calorimetertemperatur, t_1 die äussere Temperatur, h eine experimentell zu bestimmende Constante bedeutet. Auf Grund dieses Ausdruckes kann die Grösse $\Sigma(w)$, das ist die Summe aller Wärmeverluste des Calorimeters vom Beginne des Versuches bis zu dem Moment, von welchem an der Temperaturabfall constant bleibt, leicht durch die Form dargestellt werden:

$$\Sigma(w) = h\,\Delta_z \left\{\frac{t_1 + t_n}{2} + t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_{n-1} - n\,t_1\right\}$$

Die Grössen t_2, t_3 ... t_n sind die nach dem Einwerfen der Substanz in Intervallen von Δ_z Minuten beobachteten Calorimetertemperaturen. (In unserem Falle war $\Delta_z = {}^1/_4{}'$.) t_n bedeutet die dem Beginne eines gleichmässigen Temperaturabfalles entsprechende, als Endtemperatur zu wählende Temperatur. Die Constante h wurde für das benutzte Calorimeter in einer besonderen Versuchsreihe sorgfältig bestimmt.

Es wurden für jede Substanz drei Versuche ausgeführt und der Mittelwerth aus denselben in die oben abgeleitete Form der Constanten k eingeführt.

Bestimmung der Dichte.

Die Bestimmung der Dichte wurde an den Würfeln selbst vorgenommen; sie ergab sich aus zwei Wägungen derselben in Luft und Wasser.

Bestimmung der Kantenlänge.

Als Kantenlänge l eines Würfels wurde der Mittelwerth aus den mittelst eines Maassstabes gemessenen Längen seiner 12 Kanten genommen.

Im folgenden Abschnitte soll die Anwendung der beschriebenen Methode an einem Beispiele, das wir der Reihe unserer Untersuchungen entnehmen, erläutert werden.

Bestimmung des Coefficienten der inneren Wärmeleitung für Granit (I) (Fundort Schwarzwald).

Die Versuchsreihen zur Ermittlung des logarithmischen Decrementes.

D = Distanz Spiegel — Scala = 1580 mm

Empfindlichkeit des Galvanometers: 1° Temperaturdifferenz gab 13.0 Scalentheile Anschlag.

s = Ablenkung des Magnetes ausgedrückt in Millimetern.

$$\sigma = s - \frac{s^3}{4\, D^2}.$$

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\ \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\ \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\ \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
285.7	283.4	2.45240		255.7	254.1	2.40500		277.6	275.5	2.44012	
243.8	242.4	2.38453		215.7	214.7	2.33183		237.8	236.5	2.37383	
210.6	209.7	2.32160		179.0	178.4	2.25139		205.5	204.6	2.31091	
177.6	177.1	2.24822		152.8	152.4	2.19976		173.8	173.3	2.23880	
145.6	145.3	2.16227		132.2	132.0	2.12057		143.8	143.5	2.15685	
125.4	125.2	2.09760	0.29013	111.3	111.2	2.04610	0.28443	123.2	122.8	2.08920	0.28327
108.1	108.0	2.03342	0.28693	92.7	92.7	1.96708	0.28573	105.5	105.4	2.02284	0.28463
90.6	90.6	1.95713	0.28818	80.1	80.1	1.90363	0.28431	89.7	89.7	1.95279	0.28807
75.9	75.9	1.88024	0.29109	68.4	68.4	1.83506	0.29613	74.3	74.3	1.87099	0.28601
64.9	64.9	1.81224	0.28203				0.28551	64.0	64.0	1.80618	0.28586
			0.28536								0.28302
		Mittel	0.28728			Mittel	0.28722			Mittel	0.28514

Die drei erhaltenen Mittelwerthe für das logarithmische Decrement ergaben, zu einer Gruppe vereinigt, als Mittel 0.28654; zwei weitere Gruppen

Gruppe (II) 0.28894, 0.28605, 0.28818, 0.28417 und Gruppe (III) 0.28912, 0.28499, 0.29586

lieferten im Mittel 0.28683 und 0.28665.

Die zur Berechnung von k benutzten Werthe des logarithmischen Decrementes waren hiemit: $log\left(\frac{u_1}{u_1}\right) = \begin{matrix} 0.28654 \\ 0.28683 \\ 0.28665 \end{matrix}$

Die Ermittlung der specifischen Wärme.

Versuch (1)	Versuch (2)	Versuch (3)
[Ma]sse d. Gestein. = 58.187 gr.	Masse d. Gestein. = 55.067 gr.	Masse d. Gestein. = 55.067 gr.
[Wa]sserfüllung = 227.422 gr.	Wasserfüllung = 223.398 gr.	Wasserfüllung = 243.229 gr.
[Ba]rometerstand = 723.7 mm	Barometerstand = 710.0 mm	Barometerstand = 710.6 mm
[Sie]detemperatur = 98°.57.	Siedetemperatur = 98°.04.	Siedetemperatur = 98°.05.
Temperaturverlauf im Calorimeter	Temperaturverlauf im Calorimeter	Temperaturverlauf im Calorimeter
13.67 Anfangstemperatur	**14.40** Anfangstemperatur	**14.55** Anfangstemp.
14.80	16.40	16.00
17.19	17.82	17.91
17.37	18.11	18.00
17.38	18.115	18.00
17.38	18.115	18.00
17.38	18.115	18.00
17.38 Endtemperatur	**18.115** Endtemperatur	**18.00** Endtemperatur
17.37	18.10	17.99
17.36	18.09	17.98
17.35	18.08	17.97
$\Sigma(w) = 5.33$	$\Sigma(w) = 5.35$	$\Sigma(w) = 5.08$

Wasserwerth des Gefässes und Thermometers = 4.53.

[C]orrection des Thermometers wegen der Verschiebung des Nullpunktes = 0°.56.

Aus dem 1. Versuche fand sich die specifische Wärme $c = 0.1946$

» » 2. » » » » » » $c = 0.1947$

» » 3. » » » » » » $c = 0.1954$

Der zur Berechnung von k benutzte Mittelwerth war $c = 0.1949$

Die Kantenlänge des Würfels war $l = 6.271$ ctm.

seine Dichte $\varrho = 2.660$

Die ermittelten Grössen wurden in die Form für die Constante der inneren Wärmeleitung $k = \frac{\varrho\, c\, l^2}{3\,\pi^2} \cdot lg\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$ eingeführt und ergaben die Werthe $k = \begin{matrix} 0.4547 \\ 0.4544 \\ 0.4543 \end{matrix}$

Hiemit war ein Mittelwerth für die Constante der inneren Wärmeleitung gefunden

$$\boldsymbol{k = 0.4545.}$$

Messungsresultate.

Thoniger Kalk (I) (Jura).

(Enthält sehr viel Thon.)

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
223.0	221.9	2.34616		194.4	193.7	2.28713		261.3	259.6	2.41430	
190.1	189.4	2.27742		163.0	162.6	2.21112		220.8	219.8	2.34203	
159.8	159.4	2.20249		136.8	136.6	2.13545		187.4	186.8	2.27138	
132.9	132.7	2.12287		113.9	113.8	2.05614		155.1	154.8	2.18977	
109.3	109.2	2.03822		92.4	92.3	1.96520		125.4	125.2	2.09760	
91.3	91.2	1.95999	0.30794	78.0	77.9	1.89154	0.32193	106.6	106.5	2.02735	0.3167
78.1	78.0	1.89209	0.31743	65.7	65.6	1.81690	0.31958	91.5	91.4	1.96095	0.3140
65.0	64.9	1.81224	0.31040	55.2	55.1	1.74115	0.31855	76.8	76.7	1.88480	0.3104
53.4	53.3	1.72673	0.31063	45.2	45.1	1.65418	0.31499	61.2	61.2	1.78675	0.3049
45.2	45.1	1.65418	0.31149	38.4	38.3	1.58320	0.31102	52.3	52.3	1.71850	0.3108
			0.30581				0.30834				0.3088
		Mittel	0.31061			Mittel	0.31573			Mittel	0.3110

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.31061	0.31150	0.31620
0.31573	0.30884	0.31164
0.31108	0.31050	0.31137
0.31182	0.31373	0.31040
Mittel 0.31231	Mittel 0.31114	Mittel 0.31240

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2090 \\ 0.2078 \\ 0.2064 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.2077.

Dichte = 2.590

Kantenlänge = 5.534 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.4001 \\ 0.3986 \\ 0.4002 \end{matrix}\right\}$$

Mittelwerth k = **0.3996.**

Thoniger Kalk (II) (Jura).

Enthält weniger Thon als (I).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
.5	196.8	2.29403		260.8	258.9	2.41313		296.8	294.2	2.46864	
.8	166.4	2.22115		219.3	218.3	2.33905		268.8	266.9	2.42635	
.0	139.7	2.14520		178.3	177.8	2.24993		217.5	216.5	2.33546	
.4	117.3	2.06930		150.4	150.1	2.17638		181.1	180.5	2.25648	
.2	96.2	1.98318	0.31035	127.8	127.6	2.10585	0.30728	151.9	151.6	2.18070	0.28794
.2	82.2	1.91487	0.30628	106.3	106.2	2.02612	0.31293	125.1	124.9	2.09656	0.32979
.4	69.4	1.84136	0.30384	88.2	88.2	1.94547	0.30446	106.3	106.2	2.02612	0.30934
.2	59.2	1.77232	0.29698	75.2	75.2	1.87622	0.30016	90.3	90.3	1.95569	0.30079
				64.4	64.4	1.80889	0.29696	76.8	76.8	1.88536	0.29534
				54.2	54.2	1.73400	0.29212				
		Mittel	0.30448			Mittel	0.30233			Mittel	0.30464

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.30448	0.30647	0.30578
0.30464	0.30599	0.30552
0.30233	0.29885	0.29887
	0.30218	
Mittel 0.30381	Mittel 0.30337	Mittel 0.30339

Specifische Wärme $c = \left.\begin{matrix} 0.2069 \\ 0.2049 \\ 0.2063 \end{matrix}\right\}$ Dichte = 2.706

Kantenlänge = 6.071 ctm.

Mittel 0.2060.

Wärmeleitungscoefficient $k = \left.\begin{matrix} 0.4847 \\ 0.4847 \\ 0.4854 \end{matrix}\right\}$

Mittelwerth k = **0.4849.**

Kalkstein (Jura).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
324.4	321.0	2.50651		278.3	276.2	2.44122		318.1	314.9	2.49817	
266.1	264.3	2.42210		234.9	233.6	2.36847		269.6	267.6	2.42749	
221.8	220.7	2.34380		191.9	191.2	2.28149		221.1	220.1	2.34262	
185.2	184.6	2.26623		154.5	154.2	2.18808		177.8	177.3	2.24871	
151.2	150.9	2.17869	0.32782	130.8	130.6	2.11594	0.32528	148.9	148.6	2.17202	0.326
122.4	122.2	2.08707	0.33503	110.0	110.0	2.04139	0.32708	126.1	126.0	2.10037	0.327
103.7	103.6	2.01536	0.32844	91.3	91.3	1.96047	0.32102	103.5	103.4	2.01452	0.328
87.8	87.8	1.94349	0.32274					84.8	84.8	1.92840	0.320
		Mittel	0.32850			Mittel	0.32446			Mittel	0.325

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.32850	0.32498	0.32900
0.32446	0.32826	0.32387
0.32542	0.32563	0.32604
	0.32520	
Mittel 0.32612	Mittel 0.32601	Mittel 0.32630

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2045 \\ 0.2061 \\ 0.2078 \end{matrix}\right\}$$

Dichte = 2.658

Kantenlänge = 6.153 ctm.

Mittel 0.2061.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.5263 \\ 0.5259 \\ 0.5258 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.5260.}$$

Marmor (Carrara).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
1	225.3	2.35276		270.5	268.4	2.42878		272.3	270.3	2.43185	
2	187.6	2.27323		224.8	223.7	2.34967		238.8	237.5	2.37566	
1	154.7	2.18949		185.4	184.8	2.26670		193.2	192.5	2.28443	
4	127.2	2.10449		153.6	153.3	2.18554		154.0	153.7	2.18667	
1	103.0	2.01284		125.9	125.7	2.09934		128.0	127.8	2.10653	
1	86.1	1.93500	0.33992	102.1	102.0	2.00860	0.32944	107.3	107.2	2.03019	0.32532
3	72.3	1.85914	0.33823	85.7	85.7	1.93298	0.34107	88.9	88.9	1.94890	0.34547
9	59.9	1.77743	0.33035	71.5	71.5	1.85431	0.33372	72.1	72.1	1.85794	0.33553
			0.32706	59.5	59.5	1.77452	0.33123	60.5	60.5	1.78176	0.32873
							0.32482				0.32477
		Mittel	0.33389			Mittel	0.33205			Mittel	0.33196

Gruppe I.	Gruppe II.	Gruppe III
0.33389	0.33653	0.33342
0.33205	0.33499	0.33377
0.33196	0.32891	0.33185
	0.32977	
Mittel 0.33263	Mittel 0.33255	Mittel 0.33301

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2068 \\ 0.2071 \\ 0.2059 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.2066.

Dichte = 2.699

Kantenlänge = 5.828 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.4898 \\ 0.4904 \\ 0.4899 \end{matrix}\right\}$$

$$\mathbf{k = 0.4900.}$$

Granit (II) (Baveno).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
625.1	263.3	2.42045		236.6	222.5	2.34733		255.5	253.9	2.40466	
200.8	200.0	2.30103		—	—	—		194.8	194.1	2.28803	
—	—	—		157.4	157.0	2.19590		146.9	146.6	2.16613	
109.2	109.1	2.03782		118.7	118.6	2.07408	0.53442	106.8	106.7	2.02816	0.530
76.4	76.4	1.88309	0.53763	65.0	65.0	2.81291	0.53220	74.8	74.8	1.87390	0.542
57.0	57.0	1.75587	0.54516	—	—	—		55.7	55.7	1.74586	0.540
—	—	—		46.1	46.1	2.06370		42.4	42.4	1.62531	
30.8	30.8	1.48855	0.54927								
		Mittel	0.54393			Mittel	0.53331			Mittel	0.537

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.54393	0.54396	0.53268
0.53331	0.54231	0.54135
0.53791	0.53953	0.54367
	0.53720	
Mittel 0.53838	Mittel 0.54075	Mittel 0.53923

Specifische Wärme $c = \left.\begin{matrix} 0.1946 \\ 0.1949 \\ 0.1929 \end{matrix}\right\}$ Dichte = 2.596

Kantenlänge = 5.261 ctm.

Mittel 0.1941.

Wärmeleitungscoefficient $k = \left.\begin{matrix} 0.5865 \\ 0.5848 \\ 0.5839 \end{matrix}\right\}$

$$k = \mathbf{0.5850.}$$

Granit (III) (Schwarzwald).

Enthält weniger Quarz als (I).

Versuchsreihe (1)			
	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
.6	279.4	2.44623	
.7	225.5	2.35315	
.8	183.2	2.26293	
.2	146.9	2.16702	
.3	117.2	2.06893	0.37730
.5	91.4	1.96095	0.39220
.2	74.2	1.87040	0.39253
.5	60.5	1.78176	0.38526
.0	48.0	1.68124	0.38769
		Mittel	0.38699

Versuchsreihe (2)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
276.3	274.2	2.43807	
220.2	219.1	2.34064	
178.2	177.6	2.24944	
145.2	144.9	2.16107	
115.1	115.0	2.06070	0.37737
89.5	89.5	1.95182	0.38882
72.4	72.4	1.85974	0.38970
59.2	59.2	1.77232	0.38875
47.0	47.0	1.67210	0.38860
		Mittel	0.38664

Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
262.6	260.8	2.41631	
208.5	207.6	2.31723	
161.9	161.5	2.20817	
130.5	130.3	2.11494	
107.3	107.2	2.03019	0.38612
85.4	85.4	1.93146	0.38577
66.0	66.0	1.81954	0.38863
54.0	54.0	1.73239	0.38255
		Mittel	0.38576

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.38699	0.38887	0.38838
0.38664	0.38736	0.38628
0.38576	0.38217	0.38595
	0.38638	
Mittel 0.38646	Mittel 0.38619	Mittel 0.38687

Specifische Wärme $c = \left.\begin{matrix}0.1969\\0.1975\\0.1950\\0.1961\end{matrix}\right\}$ Dichte = 2.660

Kantenlänge = 5.554 ctm.

Mittel 0.1963.

Wärmeleitungscoefficient $k = \left.\begin{matrix}0.4838\\0.4845\\0.4840\end{matrix}\right\}$

$$k = \mathbf{0.4841.}$$

Gneiss (Osogna, Tessin).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right.$
279.1	276.9	2.44232		262.4	260.6	2.41597		235.9	234.6	2.37033	
232.8	231.6	2.36474		217.8	216.8	2.33606		195.9	195.2	2.29048	
191.1	190.4	2.27967		182.6	182.0	2.26007		164.8	164.4	2.21590	
153.4	153.1	2.18498		148.7	148.4	2.17143		134.7	134.4	2.12840	
128.6	128.4	2.10857		119.5	119.4	2.07700		108.8	108.7	2.03623	
108.6	108.5	2.03543	0.33375	100.3	100.2	2.00087	0.33897	92.6	92 6	1.96661	0.3341
90.3	90.3	1.95569	0.32931	84.6	84.6	1.92737	0.33519	79.2	79.2	1.89873	0.3238
74.1	74.1	1.86982	0.32398	70.0	70.0	1.84510	0.33270				0.3171
			0.31516	57.2	57.2	1.75740	0.32633				
				48.3	48.3	1.68395	0.31960				
							0.31692				
		Mittel	0.32555			Mittel	0.32828			Mittel	0.3250

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.32555	0.32419	0.32504
0.32828	0.32743	0.32794
0.32504	0.32936	0.32726
	0.32629	
Mittel 0.32629	Mittel 0.32681	Mittel 0.32674

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.1959 \\ 0.1940 \\ 0.1644 \end{matrix}\right\} \qquad \text{Dichte} = 2.685$$

Kantenlänge = 6.076 ctm.

Mittel 0.1947.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.4905 \\ 0.4897 \\ 0.4904 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.4902.}$$

Syenit.

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
09.1	306.2	2.48601		267.1	265.2	2.42357		288.2	285.8	2.45606	
78.1	276.0	2.44091		242.6	241.2	2.38238		—	—	—	
54.6	253.0	2.40312		222.5	221.4	2.34518		233.2	232.0	2.36549	
31.0	229.8	2.36135	0.16795	202.0	201.2	2.30363	0.16613	—	—	—	
08.9	208.0	2.31806	0.16884	181.5	180.9	2.25744	0.17582	192.5	191.8	2.28285	0.17321
87.7	187.1	2.27207	0.17395	161.3	160.9	2.20656	0.17698	170.8	170.3	2.23121	0.17488
70.0	169.5	2.22917		147.6	147.3	2.16820	0.17588	155.5	155.1	2.19061	0.16691
				134.4	134.2	2.12775	0.17358	130.8	130.6	2.11594	0.17736
				121.5	121.3	2.08386		113.3	113.2	2.05385	0.17862
								102.9	102.8	2.01199	
		Mittel	0.17024			Mittel	0.17367			Mittel	0.17419

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.17024	0.17672	0.17024
0.17367	0.17013	0.17509
0.17419	0.17300	0.17298
	0.17087	
Mittel 0.17270	Mittel 0.17268	Mittel 0.17277

Specifische Wärme $c = \left.\begin{matrix} 0.1987 \\ 0.1999 \\ 0.1974 \end{matrix}\right\}$ Dichte $= 2.510$

Kantenlänge $= 6.090$ ctm.

Mittel 0.1986.

Wärmeleitungscoefficient $k = \left.\begin{matrix} 0.2656 \\ 0.2650 \\ 0.2654 \end{matrix}\right\}$

$$\boldsymbol{k = 0.2653.}$$

Porphyr.

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
289.5	287.1	2.45803		324.0	320.6	2.50596		344.8	340.7	2.53237	
241.2	239.8	2.37985		262.1	260.3	2.41547		282.5	280.3	2.44762	
201.6	200.8	2.30276		217.8	216.8	2.33606		233.6	232.4	2.36624	
166.1	165.6	2.21906		181.8	181.2	2.25816		194.6	193.9	2.28758	
133.2	133.0	2.12385		151.9	151.6	2.18070		160.3	159.9	2.20385	
111.5	111.4	1.04679	0.33418	120.4	120.3	2.08027	0.32526	128.3	128.1	2.10755	0.32852
94.0	94.9	1.97313	0.33306	100.8	100.7	2.00303	0.33520	107.3	107.2	2.03019	0.34007
77.6	77.6	1.88986	0.32963				0.33303	90.0	90.0	1.95424	0.33605
			0.32920					74.7	74.7	1.87332	0.33334
											0.33053
		Mittel	0.33151			Mittel	0.33116			Mittel	0.33370

Gruppe I.	Gruppe II.	Gruppe III
0.33151	0.33065	0.33388
0.33116	0.33540	0.33086
0.33370	0.33091	0.33156
	0.33175	
Mittel 0.33212	Mittel 0.33232	Mittel 0.33208

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.1963 \\ 0.1961 \\ 0.1976 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.1966.

Dichte = 2.620

Kantenlänge = 6.138 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.5015 \\ 0.5011 \\ 0.5012 \end{matrix}\right\}$$

$$\mathbf{k = 0.5013.}$$

Basalt (vom Mittel-Rhein).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
9.2	247.7	2.39393		244.5	243.0	2.38561		268.3	266.3	2.42537	
7.1	225.9	2.35392		215.2	214.2	2.33082		242.8	241.4	2.38274	
0.9	200.0	2.30103		189.0	188.3	2.27485		—	—	—	
3.9	173.4	2.23905		165.6	165.2	2.21801		179.4	178.8	2.25237	
7.6	147.3	2.16820	0.22573	143.3	143.0	2.15534	0.23027	156.1	155.7	2.19229	0.23308
9.6	129.4	2.11193	0.24199	122.0	121.8	2.08565	0.24517	137.9	137.6	2.13862	0.24412
4.6	114.5	2.05881	0.24222	107.0	106.9	2.02898	0.24587	—	—	—	0.23743
9.9	99.9	1.99957	0.23948	95.5	95.5	1.98000	0.23801	103.6	103.5	2.01494	0.22945
								91.8	91.8	1.96284	
		Mittel	0.23735			Mittel	0.23983			Mittel	0.23602

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.23735	0.23944	0.23980
0.23983	0.23797	0.23654
0.23602	0.23475	0.23704
	0.23711	
Mittel 0.23773	Mittel 0.23731	Mittel 0.23779

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.1989 \\ 0.1999 \\ 0.1976 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.1988.

Dichte = 2.970

Kantenlänge = 6.082 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.4030 \\ 0.4037 \\ 0.4037 \end{matrix}\right\}$$

Mittelwerth $\boldsymbol{k}$ = **0.4035.**

Serpentin.

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\,\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
298.7	296.0	2.47129		289.1	286.7	2.45743		284.4	282.1	2.45040	
249.4	247.9	2.39428		249.9	248.3	2.39498		246.4	244.9	2.38899	
213.7	222.7	2.32777		212.8	211.9	2.32613		213.7	212.8	2.32797	
184.5	183.9	2.26458		177.1	176.6	2.24699		180.9	180.3	2.25600	
156.6	156.2	2.19368	0.27761	152.5	152.2	2.18241	0.27502	151.3	151.0	2.17898	0.2714
130.7	130.5	2.11561	0.27867	131.1	130.9	2.11694	0.27804	130.0	129.8	2.11327	0.2757
112.1	112.0	2.04922	0.27855	111.7	111.6	2.04766	0.27847	113.1	113.0	2.05308	0.2748
97.2	97.2	1.98767	0.27691	93.7	93.7	1.97174	0.27525	96.4	96.4	1.98408	0.2719
				81.0	81.0	1.90849	0.27392	81.3	81.3	1.91009	0.2688
		Mittel	0.27793			Mittel	0.27614			Mittel	0.2725

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.27793	0.27952	0.27662
0.27614	0.27124	0.27569
0.27256	0.27454	0.27374
Mittel 0.27554	Mittel 0.27510	Mittel 0.27535

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2444 \\ 0.2440 \\ 0.2435 \end{matrix}\right\}$$

Dichte = 2.680

Kantenlänge = 6.00 ctm.

Mittel 0.2439.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.5034 \\ 0.5041 \\ 0.5037 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.5037.}$$

Trachyt (Siebengebirge).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
3.7	261.9	2.41814		226.2	225.0	2.35218		259.4	257.7	2.41111	
4.9	233.9	2.36847		200.3	199.5	2.29994		239.1	237.7	2.37603	
2.5	211.6	2.32552		181.1	180.5	2.25648		218.3	217.3	2.33706	
2.5	191.8	2.28285		163.3	163.2	2.21272		195.8	195.1	2.29026	
2.5	172.0	2.23553	0.18261	146.4	146.1	2.16465	0.18753	173.3	172.8	2.23754	0.17357
1.9	151.6	2.18070	0.18777	129.9	129.7	2.11294	0.18700	156.0	155.6	2.19201	0.18402
8.4	138.1	2.14019	0.18533	117.4	117.3	2.06930	0.18718	141.3	141.0	2.14922	0.18784
6.2	126.0	2.10037	0.18248	106.9	106.8	2.02857	0.18415	126.5	126.3	2.10140	0.18886
3.6	113.5	2.05500	0.18053	96.3	96.3	1.98363	0.18102	112.3	112.2	2.04999	0.18755
1.7	101.6	2.00689	0.17381	85.9	85.9	1.93399	0.17895	101.6	101.5	2.00647	0.18554
2.3	92.3	1.96520	0.17499					93.1	93 1	1.96895	0.18027
								83.9	83.9	1.92376	0.17764
		Mittel	0.18107			Mittel	0.18431			Mittel	0.18316

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.18107	0.18389	0.18654
0.18316	0.18246	0.18153
0.18431	0.18291	0.18122
Mittel 0.18284	Mittel 0.18308	Mittel 0.18294

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2088 \\ 0.2095 \\ 0.2085 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.2089.

Dichte = 2.550

Kantenlänge = 6.034 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.2759 \\ 0.2758 \\ 0.2761 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.2759.}$$

Andesit.

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
246.2	244.7	2.38863		267.2	265.3	2.42374		251.4	249.8	2.39759	
210.2	209.3	2.32077		232.2	231.0	2.36361		221.3	220.3	2.34301	
182.8	182.2	2.26055		202.4	201.6	2.30449		194.5	193.8	2.28735	
160.6	160.2	2.20466		172.6	172.1	2.23578		168.8	168.3	2.22608	
137.8	137.5	2.13830	0.25033	147.0	146.7	2.16643	0.25731	142.4	142.1	2.15259	0.2450[illegible]
116.8	116.7	2.06707	0.25370	126.7	126.5	2.10209	0.26152	123.3	123.1	2.09026	0.2527[illegible]
102.1	102.0	2.00860	0.25195	111.0	110.9	2.04393	0.26056	108.2	108.1	2.03383	0.2535[illegible]
90.0	90.0	1.95424	0.25042	95.8	95.8	1.98137	0.25441	93.2	93.2	1.96942	0.2566[illegible]
		Mittel	0.25160			Mittel	0.25845			Mittel	0.2519[illegible]

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.25160	0.25559	0.25616
0.25845	0.25050	0.25377
0.25198	0.25865	0.25174
	0.25123	
Mittel 0.25401	Mittel 0.25399	Mittel 0.25389

Specifische Wärme $c = \left.\begin{matrix} 0.1998 \\ 0.1992 \\ 0.1969 \\ 0.2014 \end{matrix}\right\}$ Mittel 0.1993.

Dichte = 2.780

Kantenlänge = 6.130 ctm.

Wärmeleitungscoefficient $k = \left.\begin{matrix} 0.4112 \\ 0.4112 \\ 0.4110 \end{matrix}\right\}$

$$k = \mathbf{0.4111.}$$

Nagelflue-Conglomerat (I) (St. Gallen).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
71.3	366.2	2.56372		312.8	309.8	2.49108		394.6	388.6	2.58950	
19.9	316.7	2.50065		267.9	266.0	2.42488		327.8	324.3	2.51095	
75.2	273.2	2.43648		228.4	227.2	2.35641		280.9	278.7	2.44514	
29.4	228.2	2.35832		190.4	189.7	2.27807		239.5	238.2	2.37694	
87.5	186.9	2.27161		156.8	156.4	2.19424		200.2	199.4	2.29973	
59.2	158.6	2.20030	0.29211	134.5	134.3	2.12808	0.29684	136.6	136.2	2.21272	0.28977
36.7	136.4	2.13481	0.30035	116.1	116.0	2.06446	0.29680	140.9	140.6	2.14799	0.29823
14.9	114.8	2.05994	0.30167				0.29195				0.29715
			0.29838								
		Mittel	0.29810			Mittel	0.29519			Mittel	0.29505

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.29810	0.29997	0.29911
0.29519	0.29358	0.29374
0.29505	0.29695	0.29789
Mittel 0.29611	Mittel 0.29683	Mittel 0.29691

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2078 \\ 0.2072 \\ 0.2064 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.2071.

Dichte = 2.034

Kantenlänge = 6.048 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.3557 \\ 0.3548 \\ 0.3556 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.3554.}$$

Nagelflue-Conglomerat (II) (St. Gallen).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log\sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
330.0	323.4	2.50974		318.3	315.1	2.49845		327.8	324.3	2.51095	
248.0	246.5	2.39182		248.0	246.5	2.39182		250.9	248.3	2.39498	
191.0	190.3	2.27944		137.1	136.8	2.13609		182.9	182.3	2.26079	
148.4	148.1	2.17056		108.9	108.8	2.03663		142.3	142.0	2.15229	
113.3	113.2	2.05385		84.7	84.7	1.92788	0.46182	111.4	111.3	2.04650	
84.5	84.5	1.92686	0.45589				0.46394	86.1	86.1	1.93500	0.46445
65.8	65.8	1.81823	0.46496					63.2	63.2	1.80072	0.45998
			0.46121								0.46007
		Mittel	0.46068			Mittel	0.46288			Mittel	0.46150

Gruppe 1	Gruppe II	Gruppe III
0.46068	0.46692	0.46144
0.46288	0.46432	0.46122
0.46150	0.45647	0.46275
	0.45850	
Mittel 0.46168	Mittel 0.46155	Mittel 0.46180

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{array}{l} 0.2123 \\ 0.2102 \\ 0.2096 \end{array}\right\}$$

Mittel 0.2107.

Dichte = 2.730

Kantenlänge = 5.113 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{array}{l} 0.5397 \\ 0.5399 \\ 0.5400 \end{array}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.5399.}$$

Molasse-Sandstein (I)
(dicht).

Um zu verhüten, dass die untersuchten Molasse-Sandsteine Kühlwasser aufsaugten, wurden die Sandsteinwürfel mit einer ausserordentlich dünnen Schellackschichte überstrichen.

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	log σ	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
6.1	264.3	2.42210		277.5	275.4	2.43996		277.4	275.3	2.43981	
9.1	218.1	2.33866		224.2	223.1	2.34850		214.6	213.6	2.32960	
2.0	171.5	2.23426		177.3	176.8	2.24748		174.1	173.6	2.23955	
3.9	133.7	2.12613		137.2	136.9	2.13640		142.4	142.1	2.15259	
8.9	108.8	2.03663	0.38547	112.7	112.6	2.05154	0.38842	113.5	113.4	2.05461	0.38520
9.2	89.2	1.95036	0.38830	91.7	91.7	1.96237	0.38613	88.8	88.8	1.94841	0.38119
1.2	71.2	1.85248	0.38178	73.5	73.5	1.86629	0.38119	69.5	69.5	1.84198	0.39757
5.8	55.8	1.74663	0.37950								
		Mittel	0.38376			Mittel	0.38524			Mittel	0.38798

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.38376	0.38722	0.38925
0.38524	0.33327	0.38032
0.38798	0.38696	0.38602
Mittel 0.38566	Mittel 0.38581	Mittel 0.38519

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2061 \\ 0.2059 \\ 0.2055 \\ 0.2049 \end{matrix}\right\}$$

Dichte = 2.570

Kantenlänge = 5.551 ctm.

Mittel 0.2056.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.4877 \\ 0.4885 \\ 0.4883 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.4882.}$$

Molasse-Sandstein (II)

(weniger dicht als (I).

Versuchsreihe (1)				Versuchsreihe (2)				Versuchsreihe (3)			
s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$	s	σ	$\log \sigma$	$\log\left(\frac{u_1}{u_2}\right)$
404.0	397.7	2.59957		341.7	337.7	2.52853		354.3	349.9	2.54394	
—	—	—		307.0	304.3	2.48330		318.4	315.2	2.49859	
322.2	318.9	2.50365		272.0	270.0	2.43136		280.2	278.0	2.44404	
285.0	282.7	2.45133		236.9	235.6	2.37218		242.8	241.4	2.38274	
247.8	246.3	2.39146		210.5	209.6	2.32139	0.20714	215.6	214.6	2.33163	0.2123
—	—	—	0.20811	187.5	186.9	2.27161	0.21169	190.9	190.2	2.27921	0.2193
196.2	195.5	2.29115	0.21250	156.6	165.2	2.21801	0.21335	166.3	165.9	2.21985	0.2241
170.9	170.4	2.23147	0.21986	143.4	143.1	2.15564	0.21654	145.1	144.8	2.16077	0.2219
148.9	148.6	2.17202	0.21944					130.9	130.7	2.11628	0.2153
—	—	—	0.21615					118.5	118.4	2.07334	0.2058
120.7	120.5	2.08099	0.21016					105.6	105.5	2.02325	0.1966
107.7	107.6	2.03181	0.19966								
		Mittel	0.21437			Mittel	0.21218			Mittel	0.2136

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
0.21437	0.21673	0.21442
0.21218	0.21540	0.21294
0.21366	0.21183	0.21248
	0.21124	
Mittel 0.21340	Mittel 0.21380	Mittel 0.21328

$$\text{Specifische Wärme } c = \left.\begin{matrix} 0.2010 \\ 0.2002 \\ 0.2019 \end{matrix}\right\}$$

Mittel 0.2010.

Dichte = 2.060

Kantenlänge = 5.148 ctm.

$$\text{Wärmeleitungscoefficient } k = \left.\begin{matrix} 0.1825 \\ 0.1820 \\ 0.1821 \end{matrix}\right\}$$

$$\boldsymbol{k = 0.1822.}$$

Experimentelle Prüfung auf die Richtigkeit der Annahme, dass die Würfeloberfläche während der Kühlung die Temperatur 0° habe.

Die Theorie der Methode setzt voraus, dass die Oberfläche des zu prüfenden Würfels für alle Zeitmomente der Kühlung die Temperatur 0°, das heisst die Temperatur des Kühlwassers besitze. Die folgende Untersuchung lässt erkennen, in wie weit diese Annahme durch die Art der Kühlung verwirklicht wurde.

Für die Temperatur des Würfels im Punkte $x=y=z=\frac{l}{6}$ war auf Grund der erwähnten Voraussetzung der Ausdruck hergeleitet worden:

$$u = \left(\frac{4}{\pi}\right)^3 u_0 \cos^3 \alpha \, e^{-\frac{3\pi^2}{l^2} \cdot \frac{k}{\varrho c} \cdot t}$$

wo α den Werth 30° hat. Diese Relation enthält nebst dem Winkel α Grössen, die experimentell leicht bestimmbar sind. Misst man u_0, l, ϱ, c, k, u und t und berechnet aus der obigen Relation den Winkel α, so wird seine Annäherung an den wahren Werth 30° ein Maass für die Vollkommenheit sein, mit welcher die oben besprochene Voraussetzung erfüllt war.

Bei der Berechnung des Winkels α wurden die Grössen ϱ, c, l bereits erhaltenen Resultaten entnommen; behufs Ermittlung des logarithmischen Decrementes waren Versuchsreihen aufzustellen, welche auch zur Bestimmung der Temperaturen u dienten, indem diese, nach vorhergegangener Graduirung des Galvanometers, aus den einzelnen Daten der Reihen herausgerechnet wurden. Unmittelbar vor Beginn der Kühlung erfolgte die genaue Ablesung der Anfangstemperatur des Würfels, u_0.

Die Auswerthung der Reihen zur Ermittlung des Winkels α geschah in der üblichen, an den folgenden Beispielen leicht ersichtlichen Weise.

Bestimmung des Winkels α für Granit (I).

Erster Versuch.

Die Graduirung des Galvanometers hatte ergeben, dass der Einheit des Ausschlages $\sigma = s - \frac{s^3}{4\,D^2}$ eine Temperaturdifferenz der Löthstellen von 0°.0350 entsprach. Die Anfangstemperatur u_0 war $=$ 16°.00.

Versuchsreihe σ für die Zeit t	Die Temperaturen u	$\log u - \log u_0$	
$t =$ 1'.16 . . 281.0	9.83	0.78865 — 1	Es war $l = 6.271$ ctm,
1'.41 . . 238.1	8.33	0.71668 — 1	$\varrho = 2.66$
1'.66 . . 206.3	7.22	0.65442 — 1	$c = 0.1949$
1'.91 . . 177.9	6.22	0.58967 — 1	k wurde aus der Ver-
2'.16 . . 149.5	5.23	0.51438 — 1	suchsreihe berechnet
2'.41 . . 123.3	4.31	0.43036 — 1	$k = 0.45046$
2'.66 . . 105.2	3.68	0.36173 — 1	

Hieraus fanden sich für

$$\log \cos \alpha = \frac{\log u - \log u_0}{3} \log \left(\frac{\pi}{4}\right) + \frac{\pi^2}{\varrho\, c\, l^2}\, k\, t \cdot \frac{1}{lg\, 10}$$

die Werthe:	9.93448 — 10	Der Winkel α war somit:	30° 41′ 10″
	9.93416 — 10		30° 45′ 30″
	9.93708 — 10		30° 6′ 10″
	9.93917 — 10		29° 37′ 20″
	9.93775 — 10		29° 57′ 0″
	9.93342 — 10		30° 55′ 20″
	9.93422 — 10		30° 44′ 40″

Mittelwerth α = **30°23′52″**

Zweiter Versuch.

Versuchsreihe		u	$\log u - \log u_0$	
	$\sigma =$			Für $\sigma = 1$ war $u = 0^\circ.036$
$t = 1'$ . . .	268.2	9.65	0.80844 — 1	Es war $u_0 = 15^\circ.00$
1'.25 . .	227.5	8.19	0.73719 — 1	$l = 6.271$ ctm.
1'.50 . .	196.9	7.09	0.67456 — 1	$\varrho = 2.66$
1'.75 . .	170.1	6.12	0.61066 — 1	$c = 0.1949$
2'.00 . .	142.8	5.14	0.53487 — 1	$k = 0.4516$
2'.50 . .	100.0	3.60	0.38021 — 1	

$\log \cos \alpha =$	$\alpha =$
9.93375 — 10	30° 51' 0"
9.93408 — 10	30° 46' 35"
9.93660 — 10	30° 12' 40"
9.93904 — 10	30° 0' 50"
9.93747 — 10	29° 39' 10"
9.93342 — 10	30° 55' 20"

Mittelwerth **30°24'15"**

Wiederholte Versuche ergaben somit für α eine Abweichung von 30°, die kleiner war als $^1/_2$°, eine Uebereinstimmung, welche mit Rücksicht auf die beträchtliche Anzahl der experimentell zu bestimmenden Grössen als befriedigend bezeichnet werden darf.

Zum Zwecke einer besseren Uebersicht stellen wir zum Schlusse des Berichtes die erlangten Resultate in Form einer Tabelle zusammen.

Gestein	Dichte ϱ	Specifische Wärme c	Wärmeleitungscoefficient k	$\frac{k}{\varrho c}$
Thoniger Kalk (I) . . .	2.590	0.2077	0.3996	0.7428
Thoniger Kalk (II) . . .	2.706	0.2060	0.4849	0.8699
Kalkstein	2.658	0.2061	0.5260	0.9602
Marmor	2.699	0.2066	0.4900	0.8788
Granit (I)	2.660	0.1949	0.4545	0.8767
Granit (II)	2.596	0.1941	0.5850	1.1610
Granit (III)	2.660	0.1963	0.4841	0.9271
Gneiss	2.685	0.1947	0.4902	0.9377
Syenit	2.510	0.1986	0.2653	0.5322
Porphyr	2.620	0.1966	0.5013	0.9732
Basalt	2.970	0.1988	0.4035	0.6834
Serpentin	2.680	0.2439	0.5037	0.7706
Trachyt	2.550	0.2089	0.2759	0.5179
Andesit	2.780	0.1993	0.4111	0.7420
Nagelflue-Conglomerat (I) .	2.030	0.2071	0.3554	0.8454
Nagelflue-Conglomerat (II) .	2.730	0.2107	0.5399	0.9386
Molasse-Sandstein (I) . .	2.570	0.2056	0.4882	0.9240
Molasse-Sandstein (II) . .	2.060	0.2010	0.1822	0.4400

Vorstehende Arbeit wurde vom Sommer 1887 bis Frühjahr 1888 im physikalischen Laboratorium des eidgenössischen Polytechnikums unter der Leitung des Herrn Professor Dr. H. F. Weber ausgeführt, dem ich die Anregung zu der Arbeit verdanke.