

Zeitschrift: Helvetica Physica Acta
Band: 13 (1940)
Heft: III

Artikel: Ein hydraulischer Demonstrationsapparat zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents
Autor: Greinacher, H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-111056>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ein hydraulischer Demonstrationsapparat zur Bestimmung des mechanischen Wärmeäquivalents

von H. Greinacher (Bern).

(24. IV. 40)

1. Das Verfahren.

Lässt man eine Flüssigkeit oder ein Gas durch eine Düse hindurchströmen, so dass der Druck von p_2 auf p_1 sinkt, wobei ein strömendes Volumen v_2 auf v_1 zunimmt, so ist, wenn von der kinetischen Energie abgesehen werden kann, die bei der Drosselung abgegebene Energie $p_2 v_2 - p_1 v_1$. Einesteils wird innere Reibungsarbeit geleistet, andernteils Energie zur Vergrößerung des Volumens von v_2 auf v_1 verbraucht. Erstere erzeugt, letztere verbraucht Wärme. Sind beide Teile gleich gross wie bei einem idealen Gas, dann erfolgt keine Temperaturänderung, und es ist $p_2 v_2 = p_1 v_1$. Bei den realen Gasen überwiegt bald der eine, bald der andere Teil etwas, und wir erhalten den Thomson-Joule-Effekt, der aber als Differenzeffekt nur klein ausfällt. Anders bei einer Flüssigkeit. Hier ist v_1 nur unwesentlich grösser als v_2 , so dass praktisch die ganze Reibungsarbeit als Temperatureffekt in Erscheinung tritt. Nun lässt sich sowohl die geleistete mechanische Arbeit, als die entwickelte Reibungswärme leicht angeben. Bezeichnet man Dichte und spezifische Wärme mit ϱ und c , so haben wir für eine beliebige durch die Drosselstelle hindurchströmende Flüssigkeitsmenge m die Beziehung

$$(p_2 - p_1) v = (p_2 - p_1) \frac{m}{\varrho} = m c (t_1 - t_2) \cdot J$$

wo J das mechanische Wärmeäquivalent bedeutet. Hieraus ergibt sich daher eine besonders einfache Methode zur Bestimmung von J . Schreiben wir für $p_2 - p_1 = \Delta p$ und $t_1 - t_2 = \Delta t$, so haben wir nämlich

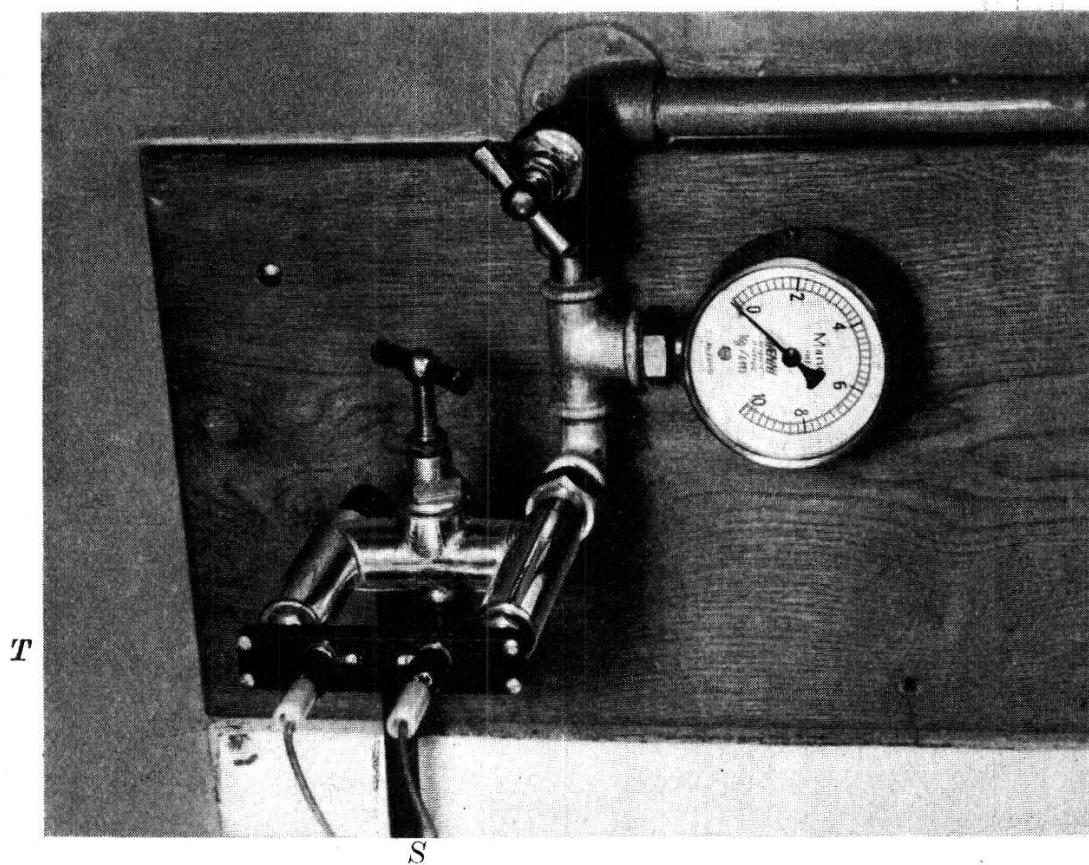
$$J = \frac{\Delta p}{\varrho \cdot c \cdot \Delta t}$$

und wählen wir, wie zweckmässig, als Flüssigkeit Wasser, so kann $\varrho = c = 1$ gesetzt werden, und man hat einfach

$$J = \frac{\Delta p}{\Delta t}.$$

Hierbei hat man den Vorteil, dass man gar kein Kalorimeter braucht. Der Versuch wird sozusagen fortdauernd an einer Kalorimeterflüssigkeit selbst ausgeführt. Wir messen nicht einen einmaligen Effekt, sondern eine stationäre Temperaturdifferenz. Dabei spielen Wärmeverluste nur eine geringe Rolle.

II I



S

Fig. 1.

2. Der Apparat.

Den fertigen Demonstrationsapparat, der an jede Wasserleitung angeschlossen werden kann, zeigt Fig. 1. An den gewöhnlichen Wasserhahn *I* ist ein kurzes Rohrstück angeschraubt, an das seitlich ein Manometer angeschlossen ist, und das unten zu einem zweiten Wasserhahn *II* führt. Vor und nach diesem zweiten Hahn wird die Temperatur mittelst einer Thermosäule *T* gemessen, deren Anschlussstecker vorne sichtbar sind. Der Versuch besteht nun darin, dass man erst *II* ganz öffnet und dann *I* soweit drosselt,

dass ein mässiger Wasserstrom aus dem Schlauch *S* tritt. Man beobachtet die Einstellung des an die Thermosäule angeschlossenen Galvanometers. Nun drosselt man Hahn *II* und öffnet *I* ganz. Man liest den Wasserdruck am Manometer ab und beobachtet die neue Galvanometereinstellung. Die Differenz entspricht dem Temperaturunterschied ohne und mit Drosselung an *II*. Um die Wassertemperatur vor und nach der Drosselung richtig zu messen, müssen die Thermoelemente in den Wasserlauf selbst hineingebracht werden. Handelt es sich aber nur um einen ganz rohen Versuch, so können die Lötstellen auch direkt an einem beliebigen Wasserrohr aussen angelötet sein. In diesem Falle erhält man aber infolge von Verlusten eine zu kleine Temperaturdifferenz und für *J* einen um 50 und mehr Prozent zu grossen Wert. Es wurde

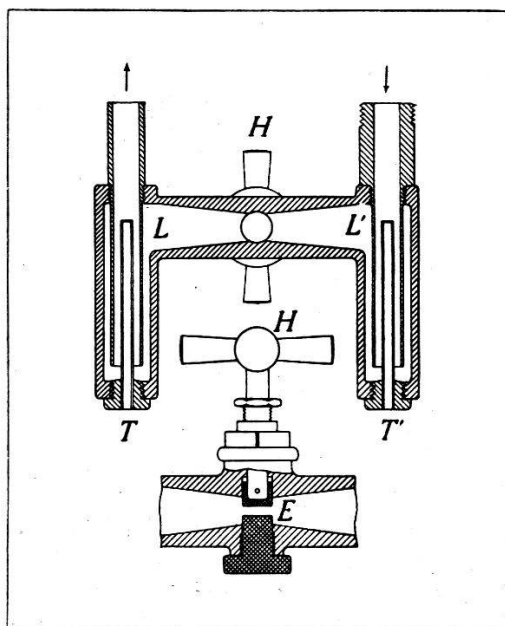


Fig. 2.

daher die in Fig. 2 wiedergegebene Anordnung getroffen. Das Wasser vor und nach der Drosselung umspült je ein dünnwandiges Messingröhrchen (lichte Weite 4 mm), in das die Lötstellen bei *T T'* hineingesteckt werden. Um eine Wärmeableitung an der Drosselstelle nach Möglichkeit zu vermeiden, lässt man das Wasser zwischen zwei die Wärme schlecht leitenden Ebonitzapfen *E* hindurchströmen, deren ebene Endflächen gegeneinander verschraubt werden können. Zur Temperaturmessung dienten 6 hintereinander geschaltete Thermoelemente Cu-Konstantan, über die zum Schutz ein am Ende verschlossenes Glasröhrchen gestülpt war (äusserer Durchmesser: 3,85 mm). Diese Röhrchen waren an einem mit Steckbuchsen versehenen isolierenden Grundplättchen befestigt. Sie wurden bis an die Enden des Messingröhrchens *LL'* hineingeschoben.

Für Demonstrationszwecke ist es natürlich erwünscht, einen möglichst grossen Galvanometerausschlag zu erhalten. Man wird also einesteils die Zahl der Thermoelemente zu vermehren, andern-teils deren inneren Widerstand zu verringern suchen. Bei einem gegebenen Lumen der Glasröhrchen bzw. der Messingröhrchen ist es am günstigsten, die Zahl der Thermoelemente und die Dicke des Konstantandrahtes so zu wählen, dass der innere Widerstand der Säule und der des Galvanometers möglichst ähnlich werden. Das wurde erreicht mit 0,35 mm Konstantandraht und 6 Thermoelementen: innerer Widerstand $8,5 \Omega$, Widerstand des Hartmann und Braun-Demonstrations-Galvanometers ca. 6Ω . Hiermit erhielt man bei 4,3 Atü Wasserdruck entsprechend $0,1^\circ$ Temperaturdifferenz 13 cm Ausschlag.

3. Versuche.

Im folgenden seien einige Versuche und Erfahrungen, die mit dem neuen Apparat gemacht wurden, mitgeteilt. Die Temperaturmessungen wurden hier mit einer Thermosäule von 6 Elementen Cu-Konstantan von $16,6 \Omega$ innerem Widerstand (Dicke des Konstantandrahtes: 0,25 mm, des Cu-Drahtes: 0,3 mm) und einem empfindlichen Hartmann & Braun'schen Galvanometer ausgeführt. Zunächst wurde bei Öffnen von Hahn II Hahn I soweit gedrosselt, dass ein Wasserstrom von etwa 1 Liter pro Minute ausfloss, was einer Strömungsgeschwindigkeit von etwa 30 cm pro Sekunde entsprach. Dabei wurde die Wassertemperatur fortlaufend kontrolliert. Sie sank von ca. 18° (Raumtemperatur) auf eine nahezu konstante Temperatur von $12,7^\circ$ — $12,9^\circ$. Nach 10 Minuten wurden nun die Galvanometerausschläge von Minute zu Minute beobachtet, indem man alle 4 Minuten die Drosselung der Hähne wechselte, d. h. die Temperaturdifferenz an II bald ohne, bald mit Druck mass. Das Resultat ist in Fig. 3 dargestellt. Man erkennt, dass die Einstellung jeweils schon nach 1' beinahe, nach 2' sicher erreicht war; ferner, dass diese immer nahezu dieselben Werte annahm. Der Wasserdruck war bei dieser Reihe ebenfalls gut konstant (Manometerablesung: 4,4 Atü, an Hand einer Eich-tabelle korrigiert: $4,4_8 \text{ kg/cm}^2$). Wenn man die Werte 2, 3 und 4 Minuten nach Wechsel der Drosselung berücksichtigt, erhält man unter Druck eine mittlere Einstellung von 109,5, ohne Druck von 15,4 mm. Wie die Eichung ergab, entsprach der Differenz von 94,1 mm eine Temperatur von $0,099_3^\circ$. Diese liefert für J den Wert

$$\frac{4,4_8 \cdot 0,98 \cdot 10^6}{0,099_3} = 4,4_2 \cdot 10^7 \text{ erg/cal.}$$

Die Eichung der Thermosäule geschah direkt mittelst zweier ungefähr gleich temperierter Wasserbäder, indem man die Temperatur des einen leicht erhöhte und die Temperaturzunahme mit einem Beckmann-Thermometer mass. Eine zuverlässige Eichung verlangt bei den kleinen Temperaturunterschieden einige Sorgfalt. Um nicht mit so kleinen Temperaturdifferenzen arbeiten zu müssen, kann die Eichung auch kalorimetrisch mit einem weniger empfindlichen Thermometer ausgeführt werden. Man taucht die beiden Enden der Thermosäule (die beiden Glasröhrchen) wieder in zwei nahezu gleich temperierte Wasserbäder. Nach Beobachtung der Galvanometereinstellung giesst man nun aus einem Gefäss mit um

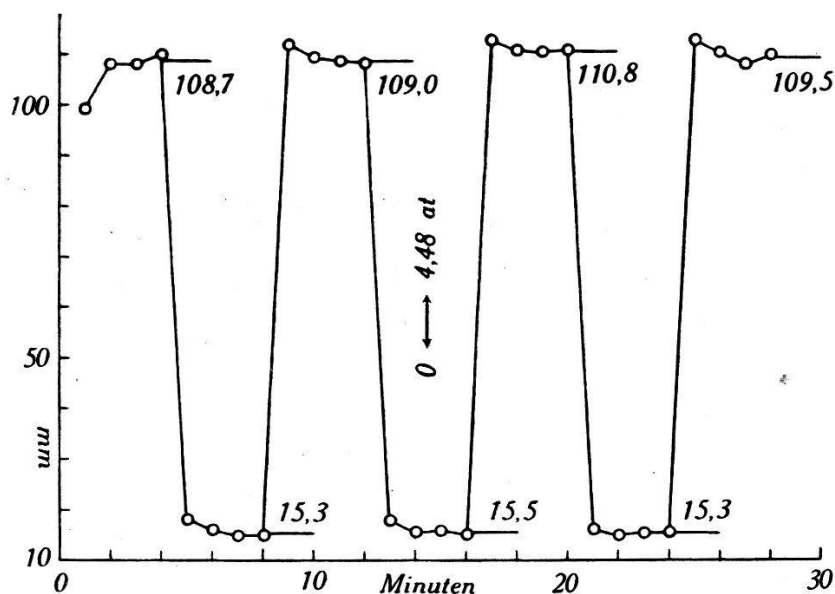


Fig. 3.

einige Grade wärmerem Wasser, eine durch Wägung leicht zu bestimmende kleine Menge Wasser zu und beobachtet nach Umrühren den neuen Galvanometerausschlag. Die Temperaturerhöhung berechnet sich in üblicher Weise. Unter Verwendung eines Becherglases als Kalorimeter erhielt man so als Eichwert $0,00104_6^0$ pro mm Ausschlag. Die direkte Eichung mit Beckmann-Thermometer lieferte $0,00105_5^0$. Da der Wasserwert des Becherglases nicht sehr genau anzugeben war, wurde dann der letztere Wert benützt.

Als Resultat zweier weniger eingehend durchgeführten Versuche seien noch erwähnt:

Δp_2 kg/cm	mm Ausschlag	Δt^0	$\frac{\Delta p \cdot 0,98 \cdot 10^6}{\Delta t}$
4,3 ₃	90	0,095 ₀	$4,4_7 \cdot 10^7$ erg/cal.
3,2	67	0,070 ₇	$4,4_4 \cdot 10^7$ „

Man erhält also trotz der ausserordentlichen Temperaturempfindlichkeit des Apparates und ohne besonderen Wärmeschutz desselben rasch und zuverlässig einen für Demonstrationszwecke ausreichend genauen Wert für J . Immerhin fallen die Resultate stets um einige Prozent zu gross aus, da die Temperaturdifferenz infolge der nicht ganz vermiedenen Wärmeverluste etwas zu klein gefunden wird.

Dass der Wärmeausgleich mit der Umgebung trotz des raschen Wasserflusses bei der hohen Temperaturempfindlichkeit immer noch merklich war, konnte unmittelbar gezeigt werden. Fasste man etwa, während das Wasser strömte, den einen Schenkel des H-förmigen Apparates an, so konnte man innert $\frac{1}{2}$ Minute leicht einen Ausschlag bis 20 mm erzielen, der dann nach Entfernen der Hand innert etwa 1 Minute zurückging. Ferner wurde festgestellt, dass die Wassertemperatur an verschiedenen Stellen des Zuflussrohrs bei stationärem Wasserstrom verschiedene Werte besitzt. Wasser, das an einem Hahn entnommen wurde, der 10,5 m Rohrleitung vom Ausfluss aus dem Apparat entfernt war, zeigte eine um $0,55^{\circ}$ tiefere Temperatur. Demzufolge war anzunehmen, dass auch an den Stellen LL' des Apparates (Fig. 2) die Temperatur etwas verschieden sein musste, auch wenn Hahn II ganz geöffnet war. Da der Wasserweg zwischen LL' etwa 20 cm beträgt, so rechnet sich eine Temperaturerhöhung von etwa $0,013^{\circ}$ an L gegenüber L' aus, was einem Galvanometeraussschlag von ca. 12 mm entspricht. Diese Temperaturdifferenz hängt von der Strömungsgeschwindigkeit des Wassers ab. In der Tat beobachtete man bei Änderung derselben eine Verschiebung der Galvanometereinstellung. Es ist daher von Wichtigkeit, dass man die Strömungsgeschwindigkeit bei abwechselnder Drosselung an I und II wenigstens ungefähr gleich gross macht. Die Geschwindigkeit selbst aber kann dabei innert beträchtlicher Grenzen verschieden gewählt werden, da bei einem Differenzversuch das Temperaturgefälle im Wasserstrom keine grosse Rolle spielt.

Um einen grossen Effekt beobachten zu können, liegt es nahe, mit kommutierter Thermosäule zu arbeiten. Man misst dann den Galvanometeraussschlag bei gedrosseltem Hahn II einmal in der einen Stellung und einmal in vertauschter Stellung der Säule und lässt beide Male den Hahn I ganz offen. Man erhält zwar den doppelten Ausschlag, aber er fällt infolge des stets vorhandenen Temperaturgradienten im Wasserstrom, der im selben Sinne wirkt, stets etwas zu gross aus. Immerhin lässt sich das Verfahren anwenden, wenn man durch genügende Wassergeschwindigkeit (4 l/Min.) für eine weitgehende Herabsetzung dieses Fehlers sorgt.

Ja, man kann sogar scheinbar ein noch besseres Resultat wie nach dem korrekten Verfahren erreichen, indem die etwas zu kleine Temperaturdifferenz durch eine entsprechende Vergrößerung infolge eines Nebeneffektes wettgemacht wird.

Zum Schluss sei noch auf eine Arbeit von J. R. ROEBUCK¹⁾ hingewiesen, in welcher die hydraulische Methode bereits angewandt wurde. Die Anordnung ist allerdings wesentlich komplizierter und der apparative Aufwand ganz bedeutend, der hier zur Erzielung eines genauen Wertes für J verwendet wird.

Physikalisches Institut der Universität, Bern.

¹⁾ J. R. ROEBUCK, Phys. Rev. (II) **2**, 79—94, 1913. A Porous Plug Method for the Mechanical Equivalent of Heat.
