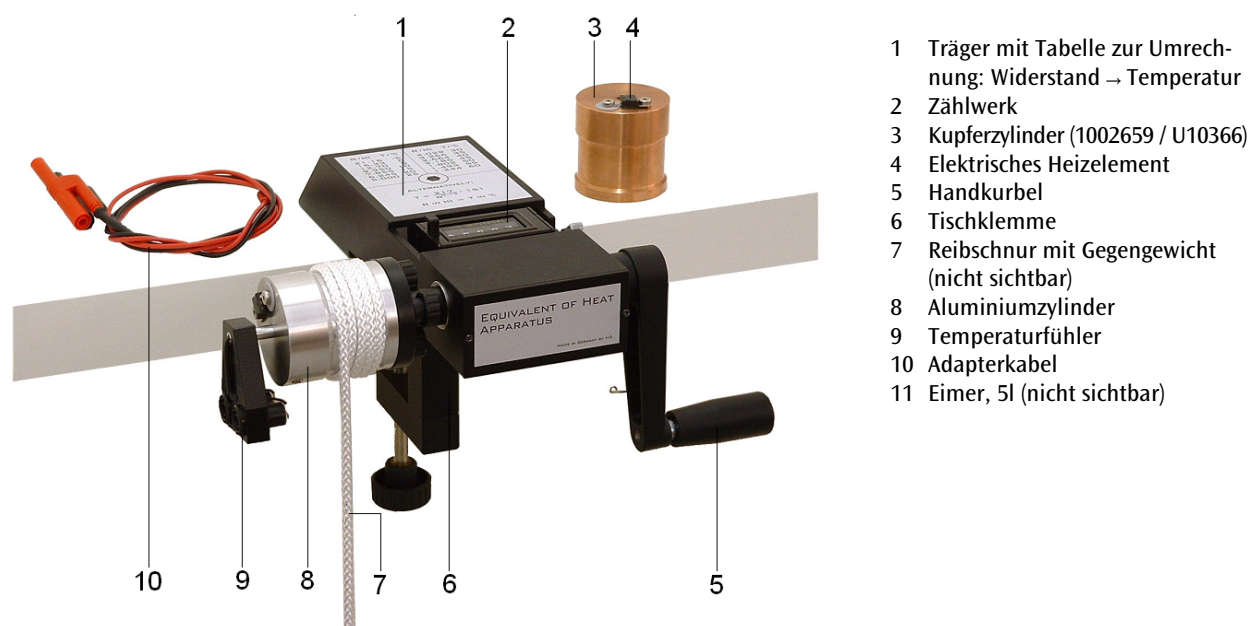


Wärmeäquivalentgerät Kupferzylinder

1002658 / U10365
1002659 / U10366

Bedienungsanleitung

10/11 MH/ALF



- 1 Träger mit Tabelle zur Umrechnung: Widerstand \rightarrow Temperatur
- 2 Zählwerk
- 3 Kupferzylinder (1002659 / U10366)
- 4 Elektrisches Heizelement
- 5 Handkurbel
- 6 Tischklemme
- 7 Reibsnur mit Gegengewicht (nicht sichtbar)
- 8 Aluminiumzylinder
- 9 Temperaturfühler
- 10 Adapterkabel
- 11 Eimer, 5l (nicht sichtbar)

Abb. 1: Komponenten

1. Sicherheitshinweise

Verletzungsgefahr! Das an der Reibsnur (7) befestigte Gewicht (ca. 5 kg) kann beim Herabfallen Personen verletzen.

- Es sollte zur Befestigung auf dem Boden stehen und während der Versuche max. ca. 10 cm angehoben werden.

Verbrennungsgefahr! Während der Versuche wird der Reibzylinder (3 oder 8) erwärmt.

- Es ist darauf zu achten, dass die Temperatur nicht über ca. 40°C ansteigt. Der maximal zulässige Strom

im Heizelement beträgt 3 A und darf nicht überschritten werden.

Stromschlaggefahr!

- Die maximale Ausgangs-Spannung des verwendeten Netzgerätes bei der elektrischen Beheizung darf 40 V nicht überschreiten.

2. Beschreibung

Mit dem Wärmeäquivalentgerät kann die Äquivalenz von mechanischer Reibungsarbeit (Nm), elektrischer Energie (Ws) und Wärme (J) gezeigt werden. Die in Nm bzw. Ws ermittelten Werte stimmen auf etwa 2% überein. Wird diese Äquivalenz vorausgesetzt, kann die spezifische Wärmekapazität von Aluminium bzw. Kupfer bestimmt werden.

Durch die stabile Konstruktion mit einem eingebauten Umdrehungszählwerk und einer doppelt kugelgelagerten Welle sind die Versuche so einfach wie möglich durchführbar. Zur Temperaturmessung kommt ein Widerstand mit negativem Temperaturkoeffizienten (NTC) zum Einsatz, der sicher in einer Aluminiumhülse untergebracht ist. Die Aluminiumhülse schnappt in die Reibzylinder ein, wodurch sie nicht unbeabsichtigt herausrutschen kann.

3. Technische Daten

Technische Daten der Reibzylinder (ca. Angaben):

Durchmesser D :	48 mm
Höhe:	50 mm
Aluminiumzylinder:	Masse $m_A = 250$ g, spezifische Wärmekapazität $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Kupferzylinder:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Elektrischer Anschluss:	Buchsen mit 2 mm Durchmesser, Pluspol „+“ isoliert, Minuspol „-“ an Masse, Verpolung führt nicht zur Zerstörung

4. Bedienung

- Das Wärmeäquivalentgerät wird mit der Tischklemme an einer stabilen Arbeitsplatte befestigt. Dann wird die Reibschnur - wie in Abb. 1 gezeigt - 4,5 bis 5,5 mal um den Reibzylinder gelegt, wobei das Gegengewicht hinten und das lose Ende der Schnur vorne herunterhängen sollte.
- Als Gewicht kann der beiliegende Eimer, der mit Wasser oder Sand etc. gefüllt wird (Gesamtmasse ca. 5 kg), verwendet werden. Das lose Ende der Reibschnur wird mit dem auf dem Boden stehenden Gewicht verbunden, wobei darauf zu achten ist, dass das Gegengewicht bei straffer Schnur nur etwa 5 cm Abstand vom Boden hat. Dadurch wird ein Anheben des Gewichtes während des Versuchs um mehr als ca. 10 cm verhindert.
- Wenn sich jetzt beim Kurbeln zeigt, dass die Schnur nach rechts läuft und ggf. nicht in der Vertiefung bleibt, dann wird die Schnur so um den Reibzylinder

gelegt, dass sich das Schnurende mit dem Gewicht rechts und das Schnurende mit dem Gegengewicht links befindet.

- Der Temperaturfühler wird mit einem Tropfen Öl benetzt (wichtig!) und gemäß Abb. 1 in den gewählten Reibzylinder gesteckt, bis er merklich einrastet und sich leicht drehen lässt (wird er zu weit oder nicht weit genug hineingeschoben dreht er sich nicht einwandfrei). Die beiden Anschlüsse des Temperaturfühlers werden mit einem Widerstandsmessgerät (Multimeter) verbunden, das im Bereich von 2 k Ω bis 9 k Ω mindestens über eine 3-stellige Anzeige verfügen sollte. Die Umrechnung des gemessenen Widerstands in die Temperatur kann entweder unter Verwendung der Tabelle auf der letzten Seite dieser Anleitung oder mit Hilfe folgender Gleichung erfolgen:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

hier ist R in k Ω einzusetzen, um T in $^{\circ}\text{C}$ zu erhalten. Diese Gleichung stimmt mit den Tabellenangaben des Herstellers von dem NTC-Widerstand im Bereich von 10 - 40 $^{\circ}\text{C}$ auf $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ überein.

- Vor einem Versuch sollte der Reibzylinder um ca. 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ unter Umgebungstemperatur abgekühlt werden. Dazu kann er entweder in einen Kühlschrank oder in kaltes Wasser gestellt werden, wobei die Temperaturfühler-Bohrung nach oben zeigen muss und die Eintauchtiefe nur etwa 2/3 der Zylinderhöhe betragen darf (Tipp: wird der Reibzylinder in einer Plastiktüte ins Wasser gestellt, muss er nach der Abkühlung nicht abgetrocknet werden).

Die Temperaturerhöhung während eines Versuchs sollte solange erfolgen, bis die Reibzylinder-Temperatur ca. 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ über der Umgebungstemperatur liegt. Je genauer die Temperaturdifferenzen (jeweils gegen Umgebungstemperatur) bei der Abkühlung und Erwärmung übereinstimmen, desto geringer ist der Netto-Wärmeaustausch mit der Umgebung.

- Zur elektrischen Beheizung der Reibzylinder liegen Adapterkabel bei, die auf der einen Seite Stecker mit 2 mm Durchmesser und auf der anderen Seite die üblichen Laborstecker mit 4 mm Durchmesser haben. Zur Stromversorgung sollte ein Netzteil mit regelbarer Spannungs- und Strombegrenzung zum Einsatz kommen, wobei die maximale Spannung des Netzteils 40 V nicht überschreiten darf. Der Pluspol des Netzgerätes wird mit der isolierten Buchse (an dem runden grauen Kunststoffplättchen unter der Buchse zu erkennen) und der Minuspol mit der anderen Buchse verbunden.
- Die Heizelemente an den Reibzylindern verhalten sich in etwa wie ohmsche Widerstände mit ca. 11 Ω . Die maximale Belastbarkeit liegt bei 36 W, d. h. bei max. 20 V und dem sich einstellenden Strom von ca.

1,8 A. Zur Einstellung eines Betriebspunktes empfiehlt es sich, die Strombegrenzung auf genau 1 A und die Spannungsbegrenzung auf etwa 15 V einzustellen. Diese Einstellungen werden jetzt nicht mehr verändert; bis zum Versuch wird der Strom einfach durch Abziehen der Kabel unterbrochen.

5. Wartung

- Das Wärmeäquivalentgerät ist prinzipiell wartungsfrei. Zur Reinigung kann es feucht (Wasser mit Spülmittel) abgewischt werden. Lösungsmittel sollten nicht verwendet werden. Auch das Eintauchen in Wasser ist zu vermeiden.
- Die Reibzylinder sollen metallisch blank sein. Falls sich ein Belag gebildet haben sollte, kann dieser mit einem Metall-Putzmittel beseitigt werden.
- Die Reibschnur kann ggf. gewaschen werden. Als kostengünstige Ersatzschnur kann geflochtenes Polyamidseil (z. B. Baumarkt) verwendet werden.

6. Versuchsdurchführung und Auswertung

6.1 Umwandlung mechanischer Arbeit in Wärme

6.1.1 Versuchsdurchführung

- Zuerst werden die verschiedenen Massen bestimmt: Hauptgewicht (z. B. Eimer mit Wasser) $m_H = 5,22$ kg Gegengewicht (an Reibschnur) $m_G = 0,019$ kg Aluminiumzylinder $m_A = 0,249$ kg
- Weitere Größen, die vorab gemessen werden sollten: Umgebungstemperatur $T_U = 23,2^\circ\text{C}$ Durchmesser des Zylinders an der Reibfläche $D_R = 45,75$ mm
- Nach der Abkühlung des Reibzylinders wird dieser an den Träger geschraubt, der Temperaturfühler eingesteckt und die Reibschnur um den Zylinder gelegt (vergl. Abschnitt 4). Nach ein paar Minuten, die zur homogenen Temperaturverteilung verstreichen sollten, beträgt der Widerstand des Temperaturfühlers $R_1 = 8,00$ k Ω (entsprechend $T_1 = 14,6^\circ\text{C}$ nach Gl. 1).
- Nach Kontrolle der Nullstellung des Zählers wird der Versuch gestartet, indem die Kurbel gedreht und dadurch das Hauptgewicht vom Boden abgehoben wird. Jetzt senkt sich das Gegengewicht auf den Boden, wodurch die Reibschnur leicht entspannt wird und etwas weniger auf dem Zylinder reibt. Das Hauptgewicht hält jetzt seine Höhe und sollte diese während des ganzen Versuchs beibehalten.
- Nach $n = 460$ Umdrehungen wird der Versuch beendet und der Widerstandswert abgelesen: $R_2 = 3,99$ k Ω ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).

- Da die Temperatur direkt nach Versuchsende noch kurz ansteigt (Homogenisierung der Temperaturverteilung), wird als Messwert der Minimalwert des Widerstandes notiert, der einige Sekunden nach Versuchsende erreicht ist. Danach steigt der Widerstand wieder an, da durch Wärmetausch mit der Umgebung die Temperatur des Zylinders fällt.

6.1.2 Versuchsauswertung

Arbeit W ist definiert als das Produkt von Kraft F und Weg s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

Bei der Reibung wirkt die Kraft

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g ist die Erdbeschleunigung) entlang des Weges

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- Einsetzen der Gln. 3 und 4 in 2 liefert:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

Die im Reibzylinder gespeicherte Wärme ΔQ ergibt sich aus der der Temperaturdifferenz ($T_2 - T_1$) und der in Abschnitt 3 angegebenen spezifischen Wärmekapazität zu:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ kJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

In diesem Beispiel beträgt die Abweichung zwischen mechanischer Arbeit und Wärme nur etwa 1%. Durch unvermeidbare Toleranzen in der Materialzusammensetzung (reines Aluminium ist sehr weich und lässt sich mechanisch kaum bearbeiten, weshalb immer Legierungen zum Einsatz kommen) kann die spezifische Wärmekapazität jedoch merklich schwanken. Sie sollte individuell für jeden Reibzylinder bestimmt werden. Dies ist am einfachsten durch elektrische Beheizung und unter Voraussetzung der Äquivalenz von Wärme und elektrischer Energie durchführbar.

6.2 Umwandlung elektrischer Energie in Wärme

6.2.1 Versuchsdurchführung

- Nach der Abkühlung des Reibzylinders wird dieser an den Träger geschraubt (gleiche Versuchsbedingungen wie beim Reibungsversuch) und der Temperaturfühler eingesteckt. Nach ein paar Minuten, die zur homogenen Temperaturverteilung verstreichen sollten, beträgt der Widerstand des Temperaturfühlers $R_1 = 8,00$ k Ω (entsprechend $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ nach Gl. 1).
- Jetzt wird das vorab eingestellte Netzgerät (siehe Abschnitt 4) an das Heizelement angeschlossen und eine Stoppuhr gestartet. Spannung und Strom (Anzeige am Netzgerät) werden notiert:
 $U = 11,4$ V; $I = 1,0$ A

- Nach $t = 300$ s wird der Versuch beendet und der Widerstandswert abgelesen:
 $R_2 = 3,98 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,32^\circ\text{C}$)
 Ebenso wird die (geringfügige) Änderung der Spannung erfasst: $U = 11,0$ V.

6.2.2 Versuchsauswertung

Die elektrische Energie E ist das Produkt aus Leistung P und Zeit t . Die Leistung wiederum ist das Produkt aus Spannung und Strom. Demnach gilt (Rechnung mit Spannungsmittelwert):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

In diesem Versuch beträgt die zugeführte Wärme

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen E und ΔQ sehr gut.

Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur beim Temperaturfühler

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11
7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35

7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71
7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83

Equivalent of Heat Apparatus Copper Cylinder

1002658 / U10365
1002659 / U10366

Instruction Sheet

10/11 MH/ALF

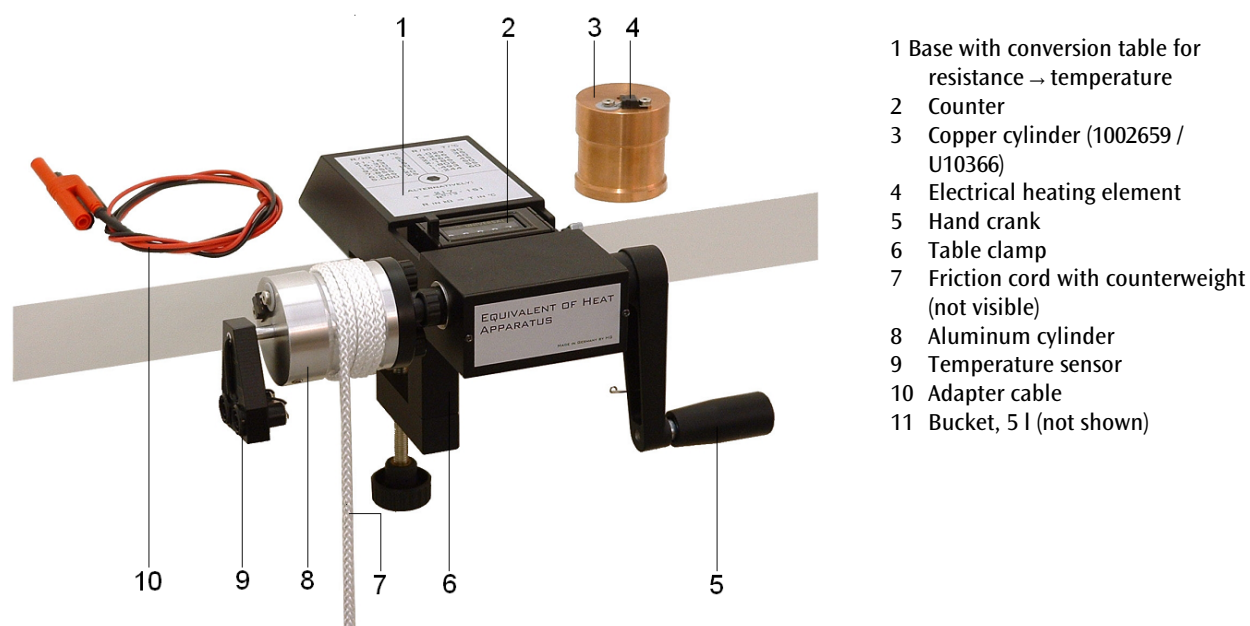


Fig.1: Components

1. Safety instructions

Risk of injury! The (approx. 5 g) weight attached to the cord (7) can cause injury to persons if it falls on them.

- It should be placed on the ground to secure it and not be raised more than about 10 cm during the experiment.

Risk of burning! During the experiments the friction cylinder (3 or 8) is heated.

- It should be observed that the temperature does not rise above about 40°C. The maximum permissible

current through the heating element is 3 A and may not be exceeded.

Risk of electric shock!

- The maximum output voltage of the power supply used for the electric heating may not be greater than 40 V

2. Description,

The equivalent of heat apparatus can be used to show the equivalence of mechanical work due to friction (Nm), electrical energy (Ws) and heat (J). The values measured in Nm or Ws agree to an accuracy of about 2%. If this equivalence is assumed, the specific heat capacity of aluminium and copper can be determined. The stable design with its integrated rotary counter and a dual ball-bearing mounted shaft make experiments as simple as possible to perform. To measure temperature a negative temperature coefficient thermistor (NTC) is used. This is safely contained inside an aluminium sleeve. The aluminium sleeve snaps into the friction cylinder so that it cannot slide out unintentionally.

3. Technical data

Technical data for the friction cylinder (approximate values):

Diameter D :	48 mm
Height:	50 mm
Aluminum cylinder:	mass $m_A = 250$ g, specific heat capacity $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Copper cylinder:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Electrical connection:	sockets of 2 mm diameter, positive pole “+” isolated, negative pole “-” connected to ground, reversal of polarity does not destroy the equip- ment

4. Operation

- The equivalent of heat apparatus is attached to a stable workbench using its table clamp. The friction cord is then wrapped around the friction cylinder $4\frac{1}{2}$ to $5\frac{1}{2}$ times with the counterweight suspended at the rear and the loose end of the cord hanging down at the front.
- The bucket provided can be filled with water or sand etc. (total weight approx. 5 kg) and used as a weight. The loose end of the friction cord is attached to the weight while the latter is resting on the ground. It should be observed that the counterweight should be no more than about 5 cm above the ground when the cord is taut. This prevents the weight being raised by more than about 10 cm during the experiment.
- If it is observed that the cord moves to the right when the crank is turned or fails to remain in its groove, then the cord should be wrapped around the cylinder so that the end of the cord with the

weight is on the right and that with the counterweight is on the left.

- The temperature sensor should be wetted with a drop of oil (important!) and inserted into the selected friction cylinder according to Fig. 1 until it is felt to snap into place and can be turned easily (if it is inserted too far or not far enough, it is not easy to turn it). The two connections of the temperature sensor are attached to a resistance meter (multimeter) operating in the range 2 k Ω to 9 k Ω with a display accurate to at least three figures. The conversion of the resistance so measured into a corresponding temperature can be performed either with the help of the conversion table on the last page of these instructions or by using the following equation:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

where R must be given in k Ω to obtain T in $^{\circ}\text{C}$. This equation agrees with the table provided by the NTC thermistor manufacturer in the range from 10 - 40 $^{\circ}\text{C}$ to an accuracy of approximately $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$.

- Before an experiment the friction cylinder should be cooled to about 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ below the ambient temperature. This can be achieved by putting it in a refrigerator or by dipping it in cold water. In the latter case the hole for the temperature sensor should point upwards and the cylinder may only be immersed to a depth of about $\frac{2}{3}$ the height of the cylinder (tip: if the friction cylinder is dipped in water inside a plastic bag, it will not need to be dried off again when it has finished cooling).
- The rise in temperature during an experiment should continue until the friction cylinder's temperature has been raised to about 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ above the ambient temperature. The more precisely the temperature differences for cooling and heating (with respect to the ambient temperature) are similar, then the smaller is the net exchange of heat with the environment.
- For heating the friction cylinder electrically, adapter cables are provided with plugs of 2 mm diameter at one end and conventional 4 mm lab plugs at the other. The power should be provided by a power supply where voltage and current limiting can be regulated. The maximum voltage from the power supply may not exceed 40 V. The positive pole of the power supply is connected to the isolated socket (identifiable due to the round, gray plate beneath the socket) and the negative is connected to the other socket.
- The heating filaments on the friction cylinders behave more or less like normal ohmic resistors with a resistance of about 11 Ω . Their maximum load capacity is about 36 W, i.e. for a max. voltage of 20 V

and corresponding current of roughly 1.8 A. To set an operating point, it is recommended that the current limit be set to exactly 1 A with voltage limited to about 15 V. These settings cannot be altered thereafter. Power is disconnected simply by removing the power lead until needed for the experiment.

5. Maintenance

- The equivalent of heat apparatus in principle requires no maintenance. It can be wiped clean with soap and water. Solvents should not be used. Immersion in water should also be avoided.
- The friction cylinders should be plain naked metal. If a coating has formed on them, this can be removed using metal cleaner.
- The friction cord can be washed if necessary. For a good value alternative, woven nylon cord can be used as a replacement.

6. Experiment procedure and evaluation

6.1 Conversion of mechanical work into heat

6.1.1 Experiment procedure

- First the various masses are measured:
Primary weight (e.g. bucket with water) $m_h = 5.22$ kg
Counterweight (at friction cord) $m_c = 0.019$ kg
Aluminium cylinder $m_A = 0.249$ kg
- Other values to be measured in advance:
Ambient temperature $T_u = 23.2^\circ\text{C}$
Diameter of cylinder where friction occurs $D_R = 45.75$ mm
- After cooling the cylinder, it should be screwed to the base, the temperature sensor should be inserted and the friction cord should be wrapped around it. (cf. Section 4). After a few minutes, that should be ignored for the sake of a homogenous temperature distribution, the resistance of the temperature sensor is $R_1 = 8,00$ k Ω (corresponding to $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ by Eq.1).
- After zeroing the counter, the experiment is begun by turning the crank and thus lifting the primary weight from the ground. This slightly loosens the cord so that it causes less friction on the cylinder. The primary weight remains at the same height and should remain there for the rest of the experiment.
- After $n = 460$ turns the experiment is halted and the resistance value read off: $R_2 = 3.99$ k Ω ($T_2 = 30.26^\circ\text{C}$). Since the temperature continues to rise for a short time after the experiment is completed (homogenizing the temperature distribution), the minimum value of the resistance is noted as the measured

value. This is reached a few seconds after the end of the experiment. After that the resistance increases again since heat is exchanged with the environment to cool the cylinder down to a lower temperature.

6.1.2 Experiment evaluation

Work W is defined as the product of force F and displacement s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

The force of friction acting is

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g is the acceleration due to gravity) in the direction of the displacement

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- Placing Equations 3 and 4 into Equation 2 gives:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5.22 \cdot 9.81 \cdot 460 \cdot 3.1416 \cdot 0.04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

The heat stored in the friction cylinder ΔQ is determined from the temperature difference ($T_2 - T_1$) and the specific heat capacity given in Section 3:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0.86 \cdot 0.249 \cdot (30.26 - 14.60) \text{ kJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

In this example the disagreement between the mechanical work and the heat energy is found to be no more than about 1%. Due to unavoidable tolerances relating to the composition of materials (aluminium is very soft and almost impossible to work mechanically, so that it is always alloyed), the specific heat capacity can fluctuate quite noticeably. The specific heat capacity is most easily calculated by heating it electrically using the equivalence between heat and electrical energy.

6.2 Conversion of electrical energy into heat

6.2.1 Experiment procedure

- After cooling the friction cylinder it should be screwed into the base (the same experimental conditions as for the friction experiment) and the temperature sensor inserted. After a few minutes that should be ignored for the sake of homogenous distribution of temperature, the resistance of the temperature sensor is $R_1 = 8.00$ k Ω (corresponding to $T_1 = 14.60^\circ\text{C}$ by Eq. 1).
- Now the power supply that has been configured in advance (see Section 4) should be connected to the heating element and a stopwatch started. Voltage and current (as displayed by the power supply) should be noted:
 $U = 11.4$ V; $I = 1.0$ A
- After $t = 300$ s the experiment is halted and the resistance of the sensor is read off:
 $R_2 = 3.98$ k Ω ($T_2 = 30.32^\circ\text{C}$)

The (slight) change in voltage is also measured:
 $U = 11.0 \text{ V}$.

6.2.2 Experiment evaluation

The electrical energy E is the product of power P and time t . The power is the product of voltage and current. Therefore (using average voltage for the calculation):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11.2 \cdot 1.0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

In this experiment, the heat added is

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0.86 \cdot 0.249 \cdot (30.32 - 14.60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

The agreement between E and ΔQ is very good in this instance as well.

Relationship between resistance and temperature of the temperature sensor

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7.86	14.97	6.78	18.19	5.70	22.05	4.62	26.84	3.54	33.10
7.84	15.03	6.76	18.26	5.68	22.13	4.60	26.94	3.52	33.24
7.82	15.08	6.74	18.32	5.66	22.21	4.58	27.04	3.50	33.38
7.80	15.14	6.72	18.39	5.64	22.29	4.56	27.14	3.48	33.51
7.78	15.19	6.70	18.45	5.62	22.37	4.54	27.24	3.46	33.65
7.76	15.25	6.68	18.52	5.60	22.45	4.52	27.35	3.44	33.79
7.74	15.31	6.66	18.58	5.58	22.53	4.50	27.45	3.42	33.93
7.72	15.36	6.64	18.65	5.56	22.61	4.48	27.55	3.40	34.07
7.70	15.42	6.62	18.72	5.54	22.69	4.46	27.66	3.38	34.22
7.68	15.47	6.60	18.78	5.52	22.77	4.44	27.76	3.36	34.36
7.66	15.53	6.58	18.85	5.50	22.85	4.42	27.87	3.34	34.50
7.64	15.59	6.56	18.92	5.48	22.94	4.40	27.97	3.32	34.65
7.62	15.64	6.54	18.99	5.46	23.02	4.38	28.08	3.30	34.79
7.60	15.70	6.52	19.05	5.44	23.10	4.36	28.18	3.28	34.94
7.58	15.76	6.50	19.12	5.42	23.19	4.34	28.29	3.26	35.09
7.56	15.81	6.48	19.19	5.40	23.27	4.32	28.40	3.24	35.24
7.54	15.87	6.46	19.26	5.38	23.35	4.30	28.51	3.22	35.39
7.52	15.93	6.44	19.33	5.36	23.44	4.28	28.62	3.20	35.54
7.50	15.99	6.42	19.40	5.34	23.52	4.26	28.72	3.18	35.69
7.48	16.05	6.40	19.46	5.32	23.61	4.24	28.83	3.16	35.84
7.46	16.10	6.38	19.53	5.30	23.69	4.22	28.95	3.14	36.00
7.44	16.16	6.36	19.60	5.28	23.78	4.20	29.06	3.12	36.15
7.42	16.22	6.34	19.67	5.26	23.87	4.18	29.17	3.10	36.31
7.40	16.28	6.32	19.74	5.24	23.95	4.16	29.28	3.08	36.47
7.38	16.34	6.30	19.81	5.22	24.04	4.14	29.39	3.06	36.63
7.36	16.40	6.28	19.88	5.20	24.13	4.12	29.51	3.04	36.79
7.34	16.46	6.26	19.95	5.18	24.21	4.10	29.62	3.02	36.95
7.32	16.52	6.24	20.03	5.16	24.30	4.08	29.74	3.00	37.11
7.30	16.57	6.22	20.10	5.14	24.39	4.06	29.85	2.98	37.28
7.28	16.63	6.20	20.17	5.12	24.48	4.04	29.97	2.96	37.44
7.26	16.69	6.18	20.24	5.10	24.57	4.02	30.09	2.94	37.61
7.24	16.75	6.16	20.31	5.08	24.66	4.00	30.20	2.92	37.78
7.22	16.81	6.14	20.39	5.06	24.75	3.98	30.32	2.90	37.94
7.20	16.88	6.12	20.46	5.04	24.84	3.96	30.44	2.88	38.11
7.18	16.94	6.10	20.53	5.02	24.93	3.94	30.56	2.86	38.29
7.16	17.00	6.08	20.60	5.00	25.02	3.92	30.68	2.84	38.46
7.14	17.06	6.06	20.68	4.98	25.11	3.90	30.80	2.82	38.63
7.12	17.12	6.04	20.75	4.96	25.21	3.88	30.92	2.80	38.81
7.10	17.18	6.02	20.83	4.94	25.30	3.86	31.04	2.78	38.99
7.08	17.24	6.00	20.90	4.92	25.39	3.84	31.17	2.76	39.17
7.06	17.30	5.98	20.97	4.90	25.48	3.82	31.29	2.74	39.35
7.04	17.37	5.96	21.05	4.88	25.58	3.80	31.42	2.72	39.53

7.02	17.43	5.94	21.12	4.86	25.67	3.78	31.54	2.70	39.71
7.00	17.49	5.92	21.20	4.84	25.77	3.76	31.67	2.68	39.90
6.98	17.55	5.90	21.28	4.82	25.86	3.74	31.79	2.66	40.08
6.96	17.62	5.88	21.35	4.80	25.96	3.72	31.92	2.64	40.27
6.94	17.68	5.86	21.43	4.78	26.05	3.70	32.05	2.62	40.46
6.92	17.74	5.84	21.50	4.76	26.15	3.68	32.18	2.60	40.65
6.90	17.81	5.82	21.58	4.74	26.25	3.66	32.31	2.58	40.84
6.88	17.87	5.80	21.66	4.72	26.34	3.64	32.44	2.56	41.04
6.86	17.93	5.78	21.74	4.70	26.44	3.62	32.57	2.54	41.23
6.84	18.00	5.76	21.81	4.68	26.54	3.60	32.70	2.52	41.43
6.82	18.06	5.74	21.89	4.66	26.64	3.58	32.84	2.50	41.63
6.80	18.13	5.72	21.97	4.64	26.74	3.56	32.97	2.48	41.83

Dispositif de mesure de l'équivalent de chaleur Cylindre en cuivre

1002658 / U10365

1002659 / U10366

Instructions d'utilisation

10/11 MH/ALF

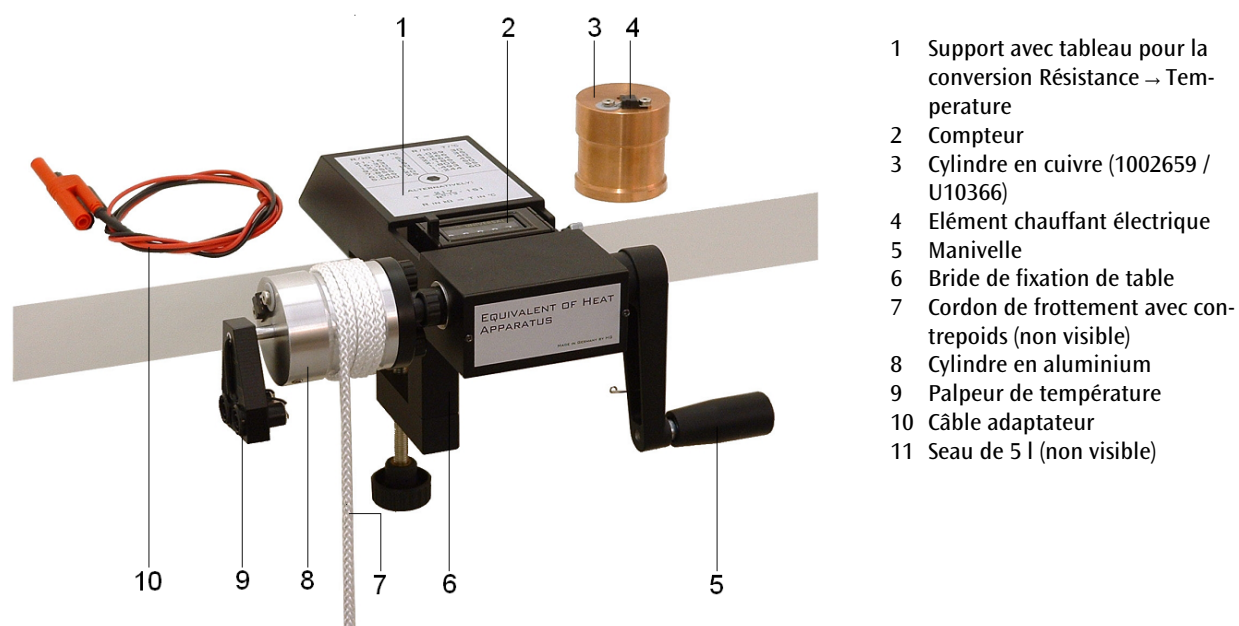


Fig.1: Composants

1. Consignes de sécurité

Risque de blessure ! En tombant, le poids (env. 5 kg) fixé au cordon (7) peut blesser des gens.

- Pour être fixé, il doit reposer sur le sol et ne pas être soulevé de plus de 10 cm pendant les expériences.

Risque de brûlure ! Le cylindre (3 ou 8) est réchauffé pendant les expériences.

- Veiller à ce que la température ne dépasse pas env. 40°C. Le courant maximum admissible dans l'élément chauffant s'élève à 3 A et ne doit pas être dépassé.

Risque de choc électrique !

- La tension de sortie maximale du bloc d'alimentation utilisé lors du réchauffement électrique ne doit pas dépasser 40 V.

2. Description

Ce dispositif de mesure permet d'indiquer l'équivalence du travail de frottement mécanique (Nm), de l'énergie électrique (Ws) et de la chaleur (J). Les valeurs déterminées en Nm et Ws coïncident à env. 2%. Cette équivalence étant sous-entendue, on peut déterminer la capacité thermique spécifique de l'aluminium et du cuivre.

Grâce à la construction robuste avec un compte-tours intégré et un arbre à double roulement à billes, les expériences peuvent être réalisées très simplement. Pour mesurer la température, on utilise une résistance à coefficient de température négatif (NTC), qui est rangée sûrement dans un boîtier en aluminium. Ce boîtier s'encoche dans le cylindre et ne peut donc pas ressortir par inadvertance.

3. Caractéristiques techniques

Caractéristiques techniques des cylindres de frottement (approx.):

Diamètre D :	48 mm
Hauteur:	50 mm
Cylindre en aluminium:	masse $m_A = 250$ g, capacité thermique spécifique $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Cylindre en cuivre:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Connexion électrique:	douilles de 2 mm de diamètre, pôle „+“ isolé, pôle „-“ à la masse, une inversion de polarité n'entraîne pas de destruction.

4. Manipulation

- Le dispositif de mesure de l'équivalent de chaleur est vissé à une plaque de travail stable à l'aide de la bride de fixation. Puis, comme le montre la figure 1, le cordon est placé 4,5 à 5,5 fois autour du cylindre, le contrepoids devant pendre à l'arrière et l'extrémité libre du cordon pendre à l'avant.
- Comme poids, on peut utiliser le seau fourni, rempli d'eau ou de sable, etc. (masse totale d'env. 5 kg). L'extrémité libre du cordon est reliée au poids se trouvant au sol. Lorsque le cordon est tendu, veiller à ce que le contrepoids ne soit pas distant de plus de 5 cm du sol, pour empêcher que le poids ne se soulève de plus de 10 cm pendant l'expérience.
- Si à présent, la manivelle étant actionnée, le cordon va à droite et, le cas échéant, ne reste pas dans sa rainure, il faudra le placer autour du cylindre de telle manière que l'extrémité du cordon avec le poids

se trouve à droite et l'extrémité avec le contrepoids à gauche.

- Humidifier le palpeur avec une goutte d'huile (important !) et l'enficher dans le cylindre sélectionné (cf. la figure 1), jusqu'à ce qu'il s'encoche et se laisse tourner facilement (s'il est trop ou pas assez enfoncé, il ne tourne pas correctement). Les deux connexions du palpeur sont reliées à un dispositif de mesure de résistance (multimètre) disposant d'un affichage à au moins trois chiffres dans une gamme entre 2 k Ω et 9 k Ω . La résistance mesurée peut être convertie en température soit à l'aide du tableau de la dernière page de ce manuel d'utilisation, soit avec l'équation suivante:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

Dans ce cas, R doit être en k Ω pour obtenir T en $^{\circ}\text{C}$. Cette équation coïncide à $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ près aux indications du tableau du constructeur de la résistance NTC dans une gamme entre 10 $^{\circ}\text{C}$ et 40 $^{\circ}\text{C}$.

- Avant toute expérience, le cylindre doit refroidir à env. 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ à température ambiante. A cet effet, on peut le placer au réfrigérateur ou dans de l'eau froide, le trou du palpeur devant être orienté vers le haut et la profondeur de plongée représenter environ 2/3 seulement de la hauteur du cylindre (astuce: si le cylindre est mis dans l'eau dans un sachet plastique, il est inutile de le sécher après son refroidissement).

La température pendant une expérience doit augmenter, jusqu'à ce que la température du cylindre soit supérieure d'env. 5 $^{\circ}\text{C}$ - 10 $^{\circ}\text{C}$ à la température ambiante. Plus les différences de température (avec la température ambiante) coïncident lors du refroidissement et du réchauffement, plus l'échange net de chaleur avec l'environnement est faible.

- Des câbles d'adaptation, qui présentent d'un côté des fiches de 2 mm de diamètre et de l'autre des fiches de laboratoire de 4 mm, servent au réchauffement électrique des cylindres. Pour l'alimentation électrique, utiliser un bloc d'alimentation à limitation de courant et de tension réglable, la tension maximale du bloc ne devant pas dépasser 40 V. Le pôle positif du bloc d'alimentation est relié à la douille isolée (pastille ronde en plastique gris sous la douille) et le pôle négatif à l'autre douille.
- Les éléments chauffants des cylindres de frottement se comportent approximativement comme des résistances ohmiques d'env. 11 Ω ; La capacité maximale de charge est de 36 W, soit une tension max. de 20 V et une intensité d'env. 1,8 A. pour paramétrer un point de fonctionnement, il est recommandé de régler la limite d'intensité sur 1 A et la limite de tension sur 15 V. Ces réglages ne seront plus modifiés, jusqu'à l'essai, le courant sera coupé en arrachant le câble.

5. Entretien

- Fondamentalement, le dispositif ne nécessite aucun entretien. Pour le nettoyer, on peut l'essuyer avec de l'eau et un produit de rinçage. Il est conseillé et ne pas utiliser de solvant. Eviter également de le plonger dans de l'eau.
- Les cylindres doivent être en métal luisant. Si un revêtement devait s'être formé, on l'essuiera avec un produit de nettoyage pour métaux.
- Le cas échéant, le cordon pourra être lavé. Comme remplacement peu coûteux pour le cordon, on peut utiliser une corde tressée en polyamide (disponible dans tout magasin de bricolage).

6. Réalisation et évaluation des expériences

6.1 Conversion du travail mécanique en chaleur

6.1.1 Réalisation de l'expérience

- Tout d'abord, il s'agit de déterminer les différentes masses:
Poids principal (par ex. seau d'eau) $m_H = 5,22$ kg
Contrepoids (sur le cordon de frottement)
 $m_G = 0,019$ kg
Cylindre en aluminium $m_A = 0,249$ kg
- Autres grandeurs devant être mesurées au préalable:
Température ambiante $T_U = 23,2^\circ\text{C}$
Diamètre du cylindre sur la surface de frottement
 $D_R = 45,75$ mm.
- Une fois refroidi, le cylindre est vissé au support, le palpeur enfiché et le cordon placé autour du cylindre (cf. paragraphe 4). Après quelques minutes, qui doivent s'écouler pour obtenir une repartition homogène de la température, la résistance du palpeur s'élève à $R_1 = 8,00$ k Ω (conformément à $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ d'après l'équation 1).
- Après avoir contrôlé la position zéro du compteur, démarrer l'expérience en tournant la manivelle pour soulever ainsi le poids principal. A présent, le contrepoids redescend sur le sol, ce qui détend légèrement le cordon qui frotte moins contre le cylindre. A présent, le poids principal conserve sa hauteur et devra la garder pendant toute la durée de l'expérience.
- Après $n = 460$ rotations, conclure l'expérience et lire la résistance: $R_2 = 3,99$ k Ω ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).
- Comme la température augmente encore un peu directement après conclusion de l'expérience (homogénéisation de la répartition de la température), on note comme valeur de mesure la résistance maximale qui est atteinte quelques secondes après la fin de l'expérience. Ensuite, la résistance se remet

à augmenter, car la température du cylindre retombe par l'échange de chaleur avec l'environnement.

6.1.2 Evaluation de l'expérience

Le travail W est défini comme le produit de la force F et du parcours s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

Lors du frottement, la force

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g représente l'accélération de la pesanteur) agit le long du parcours

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- On utilise les équations 3 et 4 dans l'équation 2 pour obtenir:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

La chaleur accumulée dans le cylindre ΔQ résulte de la différence de température ($T_2 - T_1$) et de la capacité thermique spécifique indiquée au paragraphe 3:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ kJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

Dans cet exemple, l'écart entre le travail et la chaleur ne présente qu'environ 1%. En raison de tolérances inévitables dans la composition du matériau (l'aluminium pur est très mou et ne peut guère être traité mécaniquement, aussi utilise-t-on toujours des alliages), la capacité thermique spécifique peut néanmoins varier sensiblement. Il est recommandé de la déterminer individuellement pour chaque cylindre. La méthode la plus simple est un réchauffement électrique, sous-entendu d'avoir une équivalence entre la chaleur et l'énergie électrique.

6.2 Conversion de l'énergie électrique en chaleur

6.2.1 Réalisation de l'expérience

- Une fois refroidi, le cylindre est vissé au support (mêmes conditions qu'au cours de l'expérience sur le frottement) et le palpeur enfiché. Après quelques minutes, qui doivent s'écouler pour obtenir une répartition homogène de la température, la résistance du palpeur s'élève à $R_1 = 8,00$ k Ω (conformément à $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ d'après l'équation 1).
- A présent, le bloc d'alimentation pré-réglé (cf. paragraphe 4) est branché à l'élément chauffant et un chronomètre démarré. Noter la tension et le courant (affichage sur le bloc d'alimentation):
 $U = 11,4$ V; $I = 1,0$ A
- Après $t = 300$ s, conclure l'expérience et lire la résistance:
 $R_2 = 3,98$ k Ω ($T_2 = 30,32^\circ\text{C}$)

On enregistre également la modification (infime) de la tension : $U = 11,0 \text{ V}$.

6.2.2 Evaluation de l'expérience

L'énergie électrique E est le produit de la puissance P et du temps t . La puissance est quant à elle le produit de la tension et du courant. On a alors l'équation suivante (Calcul avec la moyenne de tension):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

Au cours de cette expérience, la chaleur amenée s'élève à

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

Encore une fois, E et ΔQ coïncident très bien.

Rapport entre la résistance et la température avec un palpeur de température

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11
7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35
7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71

7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83

Apparecchio per l'equivalente termico Cilindro di rame

1002658 / U10365
1002659 / U10366

Istruzioni per l'uso

10/11 MH/ALF

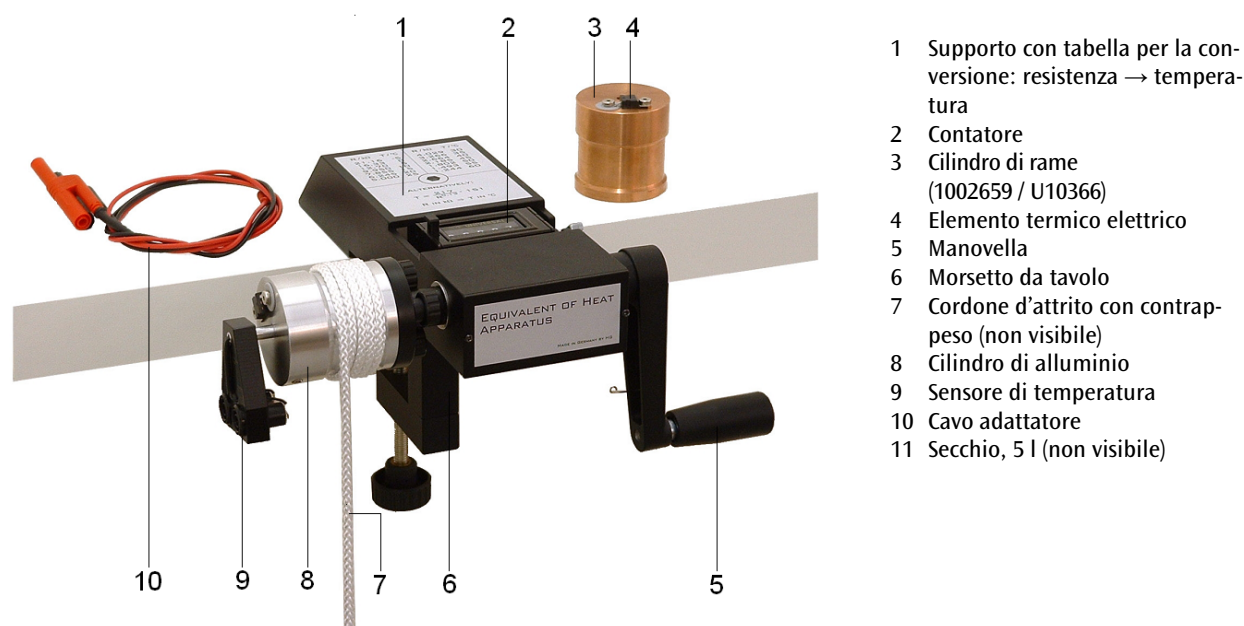


Fig. 1: Componenti

1. Norme di sicurezza

Pericolo di lesioni! Il peso fissato al cordone d'attrito (7) (circa 5 kg), in caso di caduta, può ferire eventuali persone.

- Dovrebbe essere fissato sul pavimento ed essere sollevato durante gli esperimenti di max. circa 10 cm.

Pericolo di ustioni! Durante gli esperimenti il cilindro di attrito (3 o 8) si surriscalda.

- Fare attenzione che la temperatura non superi indicativamente i 40°C. La corrente max. ammessa

nell'elemento termico è di 3 A e non deve essere superata.

Pericolo di scosse elettriche!

- In caso di riscaldamento elettrico, la tensione max. in uscita dell'alternatore utilizzato non deve superare i 40 V.

2. Descrizione

Con l'apparecchio per l'equivalente termico può essere mostrata l'equivalenza tra lavoro meccanico di attrito (Nm), energia elettrica (Ws) e calore (J). I valori determinati in Nm e/o Ws corrispondono indicativamente al 2%. Se viene premessa questa equivalenza, può essere determinata la capacità termica specifica dell'alluminio e/o del rame.

La struttura stabile, dotata di un contatore di giri incorporato e di un albero con doppio cuscinetto a sfere, rende possibile un'esecuzione semplicissima degli esperimenti. Per la misurazione della temperatura viene impiegata una resistenza con coefficiente di temperatura negativo (NTC), che viene racchiusa in modo sicuro in un involucro di alluminio. L'involucro di alluminio si chiude a scatto nel cilindro di attrito, da dove non può inavvertitamente scivolare fuori.

3. Dati tecnici

Dati tecnici dei cilindri di attrito (indicazioni approssimative):

Diametro D :	48 mm
Altezza:	50 mm
Cilindro di alluminio:	peso $m_A = 250$ g, capacità termica specifica $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Cilindro di rame:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Collegamento elettrico:	jack con diametro di 2 mm, polo positivo „+“ isolato, Polo negativo „-“ sul peso, l'inversione di polarità non comporta alcuna distruzione.

4. Uso

- L'apparecchio per l'equivalente termico viene fissato con il morsetto da tavolo su un piano di lavoro stabile. Successivamente la corda d'attrito, come mostrato in fig. 1, viene avvolta intorno al cilindro di attrito per 4,5 - 5,5 volte: in tal modo il contrappeso dovrebbe pendere verso il basso dal dietro e l'estremità libera della corda dal davanti.
- Come peso può essere utilizzato il secchio fornito in dotazione, dopo essere stato riempito con acqua, sabbia, ecc. (peso totale circa 5 kg). L'estremità libera della corda d'attrito viene legata al peso che si trova sul pavimento; fare attenzione che, in caso di corda tesa, il contrappeso ha una distanza di soli 5 cm circa dal pavimento. In tal modo durante l'esperimento risulta impossibile sollevare il peso di oltre 10 cm circa.

- Se ora azionando la manovella si nota che la corda scorre verso destra e, se necessario, non rimane nell'incavo, la corda viene avvolta intorno al cilindro di attrito in modo che l'estremità della stessa a cui è attaccato il peso si trovi a destra e l'estremità con il contrappeso a sinistra.
- Il sensore di temperatura viene inumidito con una goccia di olio (importante!) e inserito nel cilindro di attrito selezionato, come da fig. 1, fino a scattare in sede in modo percettibile e può essere ruotato facilmente (se viene inserito eccessivamente o insufficientemente, non ruota liberamente). I due attacchi del sensore di temperatura vengono collegati a un ohmmetro (multimetro), che nel range compreso tra 2 k Ω e 9 k Ω deve essere dotato di almeno un display a 3 cifre. La resistenza misurata può essere convertita in temperatura sia utilizzando la tabella presente sull'ultima pagina di queste istruzioni che con l'ausilio della seguente equazione:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

dove R deve essere inserito in k Ω , per ottenere T in $^{\circ}\text{C}$. Questa equazione ha una corrispondenza di $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ con le indicazioni della tabella del costruttore della resistenza NTC nel range compreso tra 10 e 40 $^{\circ}\text{C}$.

- Prima di eseguire un esperimento il cilindro di attrito circa 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente. A tale scopo può essere collocato in un frigorifero o in acqua fredda: il foro del sensore di temperatura deve essere rivolto verso l'altro e la profondità di immersione può essere pari solamente ai 2/3 circa dell'altezza del cilindro (consiglio: se il cilindro di attrito viene posto in acqua dopo essere stato inserito in una busta di plastica, dopo il raffreddamento non è necessario asciugarlo).

L'incremento della temperatura durante un esperimento dovrebbe proseguire fino a che la temperatura del cilindro di attrito supera di circa 5 - 10 $^{\circ}\text{C}$ la temperatura ambiente. Tanto maggiore è la corrispondenza tra le differenze di temperatura (ciascuna rispetto alla temperatura ambiente) durante il raffreddamento e il riscaldamento, quanto inferiore è lo scambio termico netto con l'ambiente.

- Per il riscaldamento elettrico dei cilindri di attrito vengono forniti cavi adattatori, che su un lato sono dotati di connettori con diametro di 2 mm e sull'altro lato di comuni connettori da laboratorio con diametro di 4 mm. Per l'alimentazione elettrica dovrebbe essere utilizzato un alternatore con limitazione di tensione e di corrente regolabile, per cui non deve essere superata la tensione max. dell'alternatore pari a 40 V. Il polo positivo dell'alimentatore viene collegato al jack isolato (sulla piastrina rotonda grigia di plastica presente sotto il jack) e il polo negativo con l'altro jack.

- Gli elementi termici sui cilindri di attrito si comportano indicativamente come resistenze ohmiche da circa 11Ω . La capacità di carico massima è pari a 36 W , con max. 20 V e una corrente regolabile di circa $1,8 \text{ A}$. Per impostare un punto d'esercizio si consiglia di impostare la limitazione di corrente esattamente a 1 A e la limitazione della tensione a circa 15 V . Queste impostazioni ora non vengono più modificate; fino all'esperimento la corrente viene interrotta semplicemente estraendo i cavi.

5. Manutenzione

- L'apparecchio per l'equivalente termico in linea di principio non richiede manutenzione. Per quanto riguarda la pulizia, può essere pulito a umido (acqua con detergente). Non impiegare solventi. Evitare di immergere l'apparecchio in acqua.
- I cilindri di attrito devono essere in metallo lucido. Se si dovesse essere formato uno rivestimento, è possibile rimuoverlo con un detergente per metalli.
- La corda di attrito può eventualmente essere lavata. Come corda sostitutiva economica può essere impiegata una fune di poliammide intrecciata (ad es. Per il mecatò dell'edilizia).

6. Esecuzione dell'esperimento e analisi

6.1 Trasformazione di lavoro meccanico in calore

6.1.1 Esecuzione dell'esperimento

- Innanzitutto vengono stabiliti i diversi pesi: peso principale (ad es. secchio con acqua) $m_H = 5,22 \text{ kg}$
contrappeso (sulla corda di attrito) $m_C = 0,019 \text{ kg}$
cilindro di alluminio $m_A = 0,249 \text{ kg}$
- Ulteriori grandezze che devono essere misurate in precedenza:
temperatura ambiente $T_U = 23,2^\circ\text{C}$
diametro del cilindro sulla superficie di attrito $D_R = 45,75 \text{ mm}$
- Dopo il raffreddamento del cilindro di attrito, quest'ultimo viene avvitato al supporto, viene inserito il sensore di temperatura e viene avvolta la corda di attrito intorno al cilindro (cfr. paragrafo 4). Dopo alcuni minuti, che dovrebbero permettere una distribuzione omogenea della temperatura, la resistenza del sensore di temperatura è pari a $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (corrispondenti a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ in base all'equazione 1).
- Dopo avere verificato l'azzeramento del contatore viene avviato l'esperimento, ruotando la manovella dal pavimento. Ora il contrappeso si abbassa sul pavimento e in tal modo viene leggermente tolto tensionamento alla corda di attrito e viene prodotto

meno attrito sul cilindro. Il peso principale mantiene ora la sua altezza, che dovrebbe rimanere la stessa durante tutto l'esperimento.

- Dopo $n = 460$ giri l'esperimento viene terminato e viene letto il valore della resistenza: $R_2 = 3,99 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).
- Poiché la temperatura aumenta ancora per poco, subito dopo la fine dell'esperimento (omogeneizzazione della distribuzione della temperatura), viene annotato come valore misurato il valore minimo della resistenza, che viene raggiunto pochi secondi dopo la fine dell'esperimento. Dopo di che la resistenza torna ad aumentare, poiché in seguito allo scambio di calore con l'ambiente scende la temperatura del cilindro.

6.1.2 Analisi dell'esperimento

Il lavoro W è definito come il prodotto della forza F e del percorso s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

In caso di attrito agisce la forza

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g è l'accelerazione terrestre) lungo il percorso

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- Inserendo le equazioni 3 e 4 nella 2 si ottiene:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

Il calore immagazzinato nel cilindro di attrito ΔQ si ottiene dalla differenza di temperatura ($T_2 - T_1$) e della capacità termica specifica indicata nel paragrafo 3:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ kJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

In questo esempio la deviazione tra il lavoro meccanico e il calore è pari solamente a circa l'1%. A causa di tolleranze inevitabili presenti nella composizione del materiale (l'alluminio puro è estremamente morbido ed è difficilmente lavorabile meccanicamente, pertanto utilizzare sempre leghe) la capacità termica specifica può tuttavia oscillare notevolmente. Deve essere determinata singolarmente per ogni cilindro di attrito. Ciò può essere eseguito nel modo più semplice mediante il riscaldamento elettrico e presupponendo l'equivalenza tra valore ed energia elettrica.

6.2 Conversione dell'energia elettrica in calore

6.2.1 Esecuzione dell'esperimento

- Dopo il raffreddamento del cilindro di attrito, quest'ultimo viene avvitato al supporto (stesse condizioni dell'esperimento relativo all'attrito) e viene inserito il sensore di temperatura. Dopo alcuni minuti, che dovrebbero permettere una distribuzione omogenea della temperatura, la resistenza del sen-

sore di temperatura è pari a $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (corrispondenti a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ in base all'equazione1).

- Ora l'alimentatore precedentemente impostato (ved. paragrafo 4) viene collegato all'elemento termico e viene avviato un cronometro. Annotare tensione e corrente (display sull'alternatore):
 $U = 11,4 \text{ V}; I = 1,0 \text{ A}$
- Dopo $t = 300 \text{ s}$ l'esperimento viene terminato e viene letto il valore della resistenza:
 $R_2 = 3,98 \text{ k}\Omega (T_2 = 30,32^\circ\text{C})$
Viene inoltre rilevata la (lieve) variazione di tensione: $U = 11,0 \text{ V}$.

6.2.2 Analisi dell'esperimento

L'energia elettrica E è il prodotto ottenuto dalla potenza P e dal tempo t . A sua volta la potenza è il prodotto derivante da tensione e corrente. Pertanto vale (calcolo con tensione media):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

In questo esperimento il calore alimentato è pari a

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

Anche in questo caso la corrispondenza tra E e ΔQ è ottima.

Correlazione tra resistenza e temperatura nel sensore di temperatura

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11
7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35

7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71
7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83

Equipo de equivalencia térmica Cilindro de cobre

1002658 / U10365

1002659 / U10366

Instrucciones de uso

10/11 MH/ALF

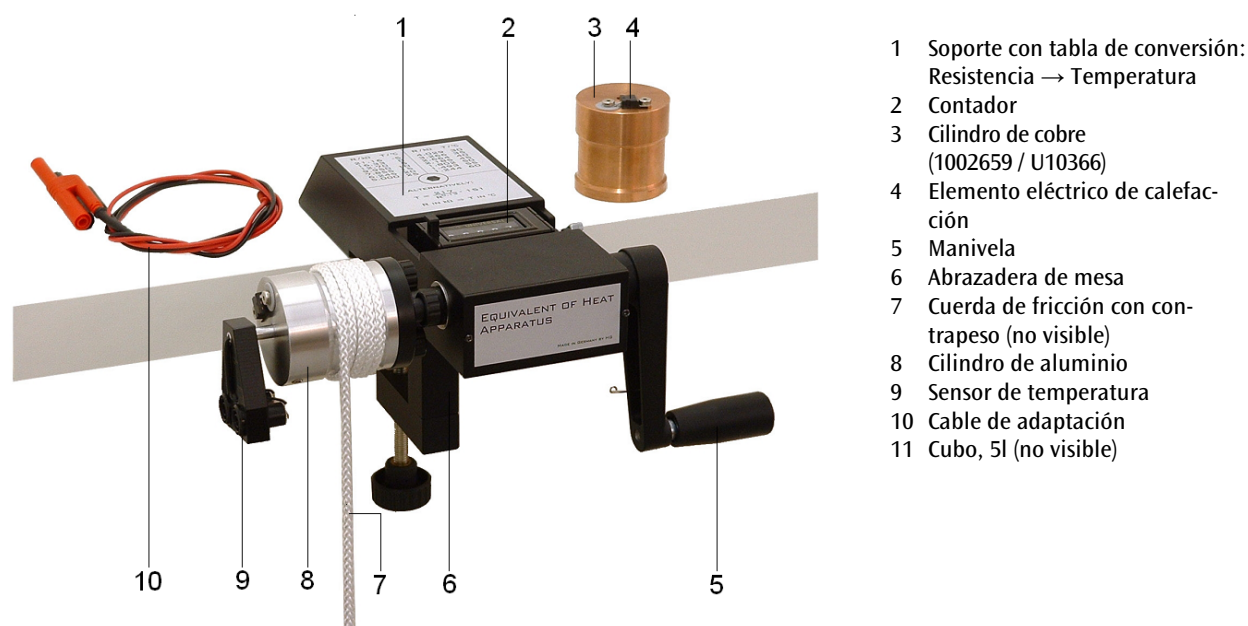


Fig. 1: Componentes

1. Aviso de seguridad

¡Peligro de heridas! La pesa (aprox. 5 kg), sostenida por la cuerda de fricción (7), podría herir a alguna persona en caso de que se desprendiera.

- Para su fijación, debe encontrarse sobre el suelo y, durante la experimentación, elevarse un máximo aproximado de 10 cm.

¡Peligro de quemaduras! Durante la experimentación, los cilindros de fricción (3 oder 8) se calientan.

- Se debe observar que la temperatura no ascienda más allá de 40°C. La máxima corriente permitida

para el elemento de calefacción es de 3 A y no se debe sobrepasar.

¡Peligro de shock eléctrico!

- La máxima tensión de salida de la fuente de alimentación empleada para la calefacción eléctrica no debe sobrepasar los 40 V schreiten.

2. Descripción

Por medio del equipo de equivalencia térmica se puede mostrar la equivalencia entre el trabajo mecánico de fricción (Nm), la energía eléctrica (Ws) y el calor (J). Los valores determinados, en Nm y Ws, concuerdan aproximadamente en un 2%. Si se presupone esta equivalencia, se puede determinar la capacidad térmica del aluminio o del cobre.

Los experimentos se pueden llevar a cabo de la manera más sencilla posible gracias a la construcción estable del equipo, el cual posee un contador de revoluciones incorporado y un eje sobre doble rodamiento de bolas. Para la medición de temperatura se emplea una resistencia con coeficiente negativo de temperatura (NTC), la cual se encuentra asegurada dentro de una cápsula de aluminio. La cápsula de aluminio se inserta en los cilindros de fricción tomando en cuenta que no resbale hacia fuera de manera no intencionada.

3. Datos técnicos

Datos técnicos de los cilindros de fricción (datos aproximados):

Diámetro D :	48 mm
Altura:	50 mm
Cilindro de aluminio:	peso $m_A = 250$ g, capacidad térmica específica $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Cilindro de cobre:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Conexión eléctrica:	clavijero de 2 mm de diámetro, polo positivo „+“ aislado, polo negativo „-“ puesto a tierra, la permutación de los polos no conduce a daños

4. Servicio

- El equipo de equivalencia térmica se fija a una placa de trabajo estable por medio de la abrazadera de mesa. A continuación, se enrolla la cuerda de fricción – como se muestra en la Fig. 1 – de 4,5 a 5,5 veces alrededor del cilindro de fricción; en este caso, el contrapeso debe pender de la parte posterior y el extremo suelto de la cuerda por delante.
- A manera de pesa se puede emplear el cubo, incluido en el suministro, llenándolo con agua o arena, etc. (peso total, aproximadamente 5 kg). El extremo suelto de la cuerda de fricción se ata al peso que se encuentra sobre el suelo, durante lo cual se debe observar que el contrapeso, con la cuerda tensada, se encuentre a una distancia de 5 cm del suelo. De esta manera se evita que, durante el experimento, el peso se eleve más allá de aprox. 10 cm.

- Si ahora, al accionar la manivela, se observa que la cuerda se mueve hacia la derecha y, dado el caso, permanece en la hendidura, entonces se debe colocar la cuerda alrededor del cilindro de fricción de manera que el extremo de la cuerda que sostiene el peso se encuentre a la derecha, y el que sostiene el contrapeso a la izquierda.
- El sensor de temperatura se debe humedecer con una gota de aceite (¡importante!), y se lo debe colocar, según se muestra en la Fig. 1, en el cilindro de fricción seleccionado, hasta que se enclave notoriamente y se lo pueda hacer girar con facilidad (si se lo inserta demasiado profundamente o no lo suficiente, no gira con soltura). Ambas conexiones del sensor de temperatura se conducen a un instrumento de medición de resistencia (multímetro), el cual debe disponer, por lo menos, de un display de tres dígitos, en un rango de 2 k Ω bis 9 k Ω . La conversión de la resistencia medida en temperature se puede realizar empleando la tabla adjunta a la última página de estas instrucciones, o por medio de la siguiente ecuación:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

Aquí se debe introducir una R en k Ω , para obtener T en $^{\circ}\text{C}$. Esta ecuación concuerda en $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ con la tabla de indicaciones del fabricante de la resistencia NTC, en un rango de 10 a 40 $^{\circ}\text{C}$.

- Antes de realizar el experimento, el cilindro de fricción se debe enfriar aproximadamente de 5 a 10 $^{\circ}\text{C}$ por debajo de la temperatura ambiente. Para el efecto, se lo puede guardar en una nevera o sumergirlo en agua fría, tomando en cuenta que la perforación del sensor de temperatura apunte hacia arriba y que la profundidad de inmersión solo sea de 2/3 de la altura del cilindro (Consejo: si se introduce el cilindro dentro de una bolsa de plástico, antes de sumergirlo en agua, no será necesario secarlo después del enfriamiento).

El aumento de temperatura, durante un experimento, debe proseguir hasta que la temperatura del cilindro de fricción se encuentre aprox. entre 5 a 10 $^{\circ}\text{C}$ por encima de la temperatura ambiente. Mientras más exactas sean las diferencias de temperature durante el enfriamiento y el calentamiento (correspondientemente, con relación a la temperature ambiente), menor será el intercambio neto de calor con el ambiente.

- Para el calentamiento eléctrico de los cilindros de fricción se dispone de cables de adaptación, los cuales poseen, en un extremo, un conector de 2 mm de diámetro y, en el otro, los convencionales conectores de laboratorio de 4 mm de diámetro. Para la alimentación de corriente se debe emplear una fuente de alimentación con limitación de tension y corriente regulable, observándose que no se sobrepase una tensión máxima de la fuente de ali-

mentación de 40 V. El polo positivo de la fuente de alimentación se conecta al clavijero aislado (reconocible por la plaquita redonda gris de plástico que se encuentra debajo del clavijero) y el polo negativo con el otro clavijero.

- Los elementos eléctricos calefactores en los cilindros de fricción se comportan similarmente a resistencias óhmicas de aprox. 11Ω . La máxima capacidad de carga se encuentra alrededor de 36 W, es decir, con la tensión máxima de 20 V y la corriente de aprox. 1,8 A que se establece. Para el ajuste de un determinado punto de trabajo se recomienda ajustar la limitación de corriente en exactamente 1 A y la de tensión en 15 V. Estos ajustes no se vuelven a cambiar, hasta iniciar la realización del experimento se interrumpe sencillamente la corriente desconectando el cable.

5. Mantenimiento

- En principio, el equipo de equivalencia térmica no necesita mantenimiento. Para su limpieza se lo puede frotar con un paño húmedo (agua con agente de limpieza.) No se deben emplear soluciones para tal efecto. También se debe evitar el sumergimiento en agua.
- Los cilindros de fricción deben presentar un blanco metálico. En el caso de que se haya formado alguna capa, ésta se puede eliminar con algún agente de limpieza de metales.
- Dado el caso, se puede lavar la cuerda de fricción. Como cuerda de recambio módica se puede emplear una cuerda trenzada de poliamida (p. ej. De las adquiribles en ferreterías).

6. Ejecución y evaluación del experimento

6.1 Transformación de trabajo mecánico en calor

6.1.1 Ejecución del experimento

- Primero se determinan los diferentes pesos:
Peso principal (p. ej. cubo lleno de agua) $m_H = 5,22 \text{ kg}$
Contrapeso (en la cuerda de fricción) $m_C = 0,019 \text{ kg}$
Cilindro de aluminio $m_A = 0,249 \text{ kg}$
- Otras magnitudes que se deben medir previamente:
Temperatura ambiente $T_U = 23,2^\circ\text{C}$
Diámetro del cilindro en la superficie de fricción $D_R = 45,75 \text{ mm}$
- Después de que el cilindro de fricción se haya enfriado, se lo atornilla a la placa soporte, se inserta el sensor de temperatura y se enrolla la cuerda de fricción alrededor del cilindro (véase apartado 4). Tras un par de minutos, los cuales deben transcurrir para que se produzca una repartición homogénea de la

temperatura, la resistencia del sensor de temperatura es de $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (correspondientemente, $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$, de acuerdo con la ecuación 1).

- Después del control del ajuste a cero del contador, se inicia el experimento, para lo cual se da vuelta a la manivela con lo que el peso principal se eleva del suelo. Ahora el contrapeso se asienta en el suelo, on lo que la cuerda de fricción se tensa levemente y jerce algo de fricción sobre el cilindro. El peso principal se mantiene ahora en su altura y debe permanecer así durante todo el experimento.
- Después de $n = 460$ revoluciones finaliza el experimento y se lee el valor de la resistencia: $R_2 = 3,99 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).
- Dado que directamente tras la finalización del experimento la temperatura asciende levemente (homogeneización de la distribución de la temperatura), se anota como valor de medida el valor mínimo de Resistencia que se alcanzó unos segundos después de la finalización del experimento. Después, la Resistencia vuelve a ascender, dado que la temperatura del cilindro desciende debido al intercambio de calor con el medio ambiente.

6.1.2 Evaluación del experimento

El trabajo W se define como el producto de la fuerza F y el desplazamiento s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

Durante la fricción actúa la fuerza

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(siendo g la aceleración terrestre) a lo largo del desplazamiento:

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- La introducción de las ecuaciones 3 y 4 en 2 conduce:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

El calor almacenado en el cilindro de fricción ΔQ se obtiene a partir de la diferencia de temperatura ($T_2 - T_1$) y la capacidad térmica específica indicada en el apartado 3:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ kJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

En este ejemplo, la discrepancia entre el trabajo mecánico y el calor es de solamente 1%. No obstante, debido a las tolerancias inevitables en la composición del material (el aluminio puro es muy suave y es apenas posible procesarlo mecánicamente, por lo que siempre se emplean aleaciones) se pueden presentar discrepancias notables en la capacidad térmica específica. Ésta se debe determinar individualmente para cada cilindro de fricción. La manera más sencilla de hacerlo se basa en el calentamiento eléctrico y en la equivalencia del calor y la energía eléctrica.

6.2 Transformación de la energía eléctrica en calor

6.2.1 Ejecución del experimento

- Después del enfriamiento del cilindro de fricción, se lo atornilla al soporte (iguales condiciones de experimentación que en el experimento de fricción) y se inserta el sensor de temperatura. Tras un par de minutos, los cuales deben transcurrir para que se produzca una repartición homogénea de la temperatura, la resistencia del sensor de temperatura es de $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$ (correspondientemente, $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$, de acuerdo con la ecuación 1).
- Ahora se conecta la fuente de alimentación previamente ajustada (véase apartado 4) al elemento de calefacción y se inicia el conteo con un cronómetro.
- Se anota la tensión y la corriente (indicación en la fuente de alimentación):
 $U = 11,4 \text{ V}$; $I = 1,0 \text{ A}$

- Después de $t = 300 \text{ s}$ finaliza el experimento y se lee el valor de la resistencia:

$$R_2 = 3,98 \text{ k}\Omega \quad (T_2 = 30,32^\circ\text{C})$$

En la misma forma se capta la variación (leve) de la tensión: $U = 11,0 \text{ V}$.

6.2.2 Evaluación del experimento

La energía eléctrica E es el producto de la potencia P y el tiempo t . La potencia, por su parte, es el producto de la tensión y la corriente. De acuerdo a lo anterior, es válido (Cálculo con valores promedio de la tensión):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

En este experimento, el calor suministrado es de

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

También aquí la concordancia entre E y ΔQ es bastante buena.

Relación entre resistencia y temperatura en los sensores de temperatura

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11

7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35
7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71
7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83

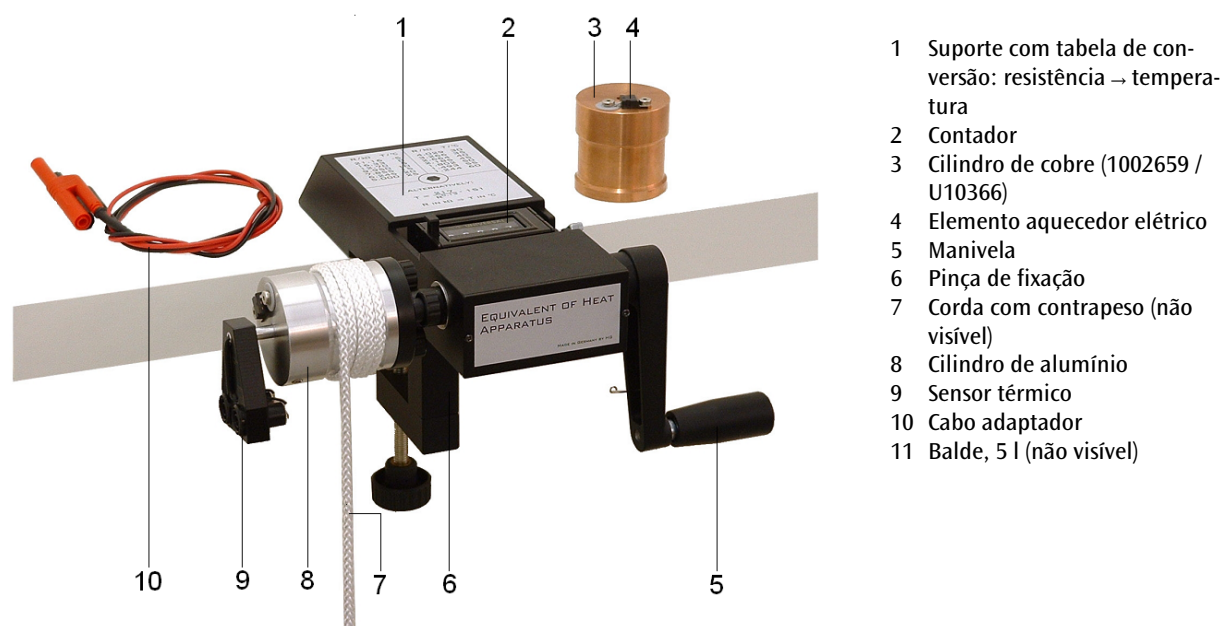
Aparelho para o equivalente térmico Cilindro de cobre

1002658 / U10365

1002659 / U10366

Instruções de operação

10/11 MH/ALF



- 1 Suporte com tabela de conversão: resistência – temperatura
- 2 Contador
- 3 Cilindro de cobre (1002659 / U10366)
- 4 Elemento aquecedor elétrico
- 5 Manivela
- 6 Pinça de fixação
- 7 Corda com contrapeso (não visível)
- 8 Cilindro de alumínio
- 9 Sensor térmico
- 10 Cabo adaptador
- 11 Balde, 5 l (não visível)

Fig. 1: Componentes

1. Indicações de segurança

Perigo de ferimento! O peso (aprox. 5 kg) que se encontra preso na corda (7) pode ferir alguém se cair.

- Ele deve estar apoiado no chão na hora de fixá-lo, e durante as experiências ele nunca deve ser levantado a mais de uns 10 cm do chão.

Perigo de queimaduras! Durante as experiências, o cilindro de atrito (3 ou 8) é aquecido.

- Deve-se prestar atenção para que a temperatura não ultrapasse os 40°C. A corrente máxima admitida

no elemento aquecedor é de 3 A e não deve ser ultrapassada

Perigo de choque elétrico!

- A tensão de saída máxima do aparelho de alimentação elétrica utilizado no aquecimento elétrico não deve passar dos 40 V.

2. Descrição,

Com o aparelho de equivalente térmico pode-se demonstrar a equivalência entre trabalho mecânico de atrito (Nm), energia elétrica (Ws) e calor (J). Os valores obtidos em Nm ou em Ws coincidem até aprox. 2%. Se esta equivalência é tomado como preceito, então pode-se determinar a capacidade térmica do alumínio ou do cobre.

Graças à construção robusta com um contador de rotações integrado e um eixo de duplo rolamento, as experiências são tão simples quanto possível de serem realizadas. Para a medição da temperatura, é utilizada uma resistência com coeficiente térmico negativo (NTC), o qual está seguro dentro de uma cápsula de alumínio. A cápsula de alumínio prende no cilindro de atrito, pelo qual ela não pode escorregar involuntariamente.

3. Dados técnicos

Dados técnicos dos cilindros de atrito (dados aproximativos):

Diâmetro D :	48 mm
Altura:	50 mm
Cilindro de alumínio:	massa $m_A = 250$ g, capacidade térmica específica $c_A = 0,86$ kJ/kg K,
Cilindro de cobre:	$m_K = 750$ g, $c_K = 0,41$ kJ/kg K
Conexão elétrica:	tomadas com diâmetro de 2 mm, pólo positivo “+” isolado, pólo negativo “-” na massa, troca de pólos não leva à destruição

4. Utilização

- O aparelho para o equivalente térmico é fixado à mesa de trabalho com uma pinça de fixação. Depois, enrola-se a corda de 4,5 a 5,5 vezes no cilindro de atrito, como indicado na Fig. 1, sendo que o contrapeso deve estar pendurado atrás e a extremidade solta da corda na frente.
- Como contrapeso, pode ser utilizado o balde fornecido, o qual é preenchido com água ou areia, por exemplo, (massa total aprox. 5 kg). A extremidade solta da corda é ligada ao peso que se encontra no chão, sendo que se deve prestar atenção para que o contrapeso com a corda tensa não se encontre a mais do que uns 5 cm do chão. Assim evita-se que o peso suba mais do que 10 cm durante a experiência.
- Se ao acionar a manivela constata-se que a corda foge para a direita e eventualmente não fica na

ranhura, então se deve colocar a corda no cilindro de atrito de modo a que a extremidade ligada ao peso esteja à direita e a extremidade com o contrapeso se encontre à esquerda.

- O sensor de temperatura deve ser lubricado com uma gota de óleo (**importante!**) e deve ser logo, como indicado na Fig. 1, introduzido no cilindro de atrito escolhido até que ele encaixe sensivelmente e possa ser levemente girado (se não for introduzido à profundidade suficiente ou profundamente demais, ele não gira livremente). Ambos os contatos do sensor de temperatura são conectados com um aparelho de medição de resistência (multímetro) que deveria ter um display de no mínimo 3 dígitos na faixa de 2 k Ω até 9 k Ω . A conversão da resistência medida em temperatura pode ser efetuada por meio da tabela que se encontra na última página deste manual ou com a ajuda da seguinte equação:

$$T = \frac{217}{R^{0,13}} - 151 \quad (1)$$

aqui se deve aplicar R em k Ω para se obter a T em $^{\circ}\text{C}$. Esta equação coincide com os dados da tabela do fabricante por resistência NTC na faixa de 10 a 40 $^{\circ}\text{C}$ em $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$.

- Antes de uma experiência, o cilindro de atrito deve ser esfriado em aprox. 5 a 10 $^{\circ}\text{C}$ abaixo da temperatura ambiente. Para tal este pode ser colocado na geladeira ou em água fria, sendo que a perfuração para o sensor de temperatura deve estar para cima e só 2/3 do cilindro devem ser submergidos (dica: se o cilindro de atrito for colocado na água num saco plástico, este não precisará ser secado após o resfriamento).

O aumento da temperatura do cilindro de atrito durante uma experiência não deve passar de uma temperatura de aprox. 5 a 10 $^{\circ}\text{C}$ acima da temperatura ambiente. Quanto mais precisamente coincidirem as diferenças de temperatura (em relação à temperatura ambiente correspondente) no aquecimento e no resfriamento, tanto menor será a troca de calor com o meio ambiente.

- Para o aquecimento elétrico do cilindro encontram-se cabos adaptadores com tomadas de 2 mm de diâmetro de um lado e tomadas comuns de laboratório de 4 mm de diâmetro. Para a alimentação elétrica deve-se utilizar um aparelho de alimentação com limite regulável de tensão e de corrente, sendo que tensão máxima do aparelho de alimentação elétrica não deve passar de 40 V. O pólo positivo do aparelho de alimentação elétrica deve ser conectado com a tomada isolada (reconhecível na plaquinha de plástico redonda cinza abaixo da tomada) e o pólo negativo na outra tomada.
- Os elementos de aquecimento no cilindro de atrito mantêm-se aproximadamente como resistências ôhmicas com cerca de 11 Ω . A capacidade máxima

de carga está situada em 36 W, é dizer, em 20 V no máximo e a corrente que se instalará em aprox. 1,8 A. Para a regulação de um ponto de operação recomenda-se, ajustar o limite da corrente em exatamente 1 A e o limite da tensão em aproximadamente 15 V. De agora em diante estes ajustes não mais serão modificados; até a experiência a corrente elétrica será simplesmente interrompida por meio do desligamento dos cabos.

5. Manutenção

- Em princípio, o aparelho para o equivalente térmico não requer manutenção. Para a limpeza pode-se utilizar um pano úmido (água com detergente caseiro). Não se deve utilizar solventes. A imersão na água também deve ser evitada.
- Os cilindros de atrito devem estar com o metal limpo. Caso tenha se formado um depósito, este pode ser retirado com um produto de limpeza para metais.
- A corda pode ser lavada caso for necessário. Como alternativa econômica para uma corda de reposto pode-se utilizar uma corda de poliamida (na loja de materiais).

6. Execução e análise da experiência

6.1 Transformação de trabalho mecânico em calor

6.1.1 Execução da experiência

Primeiro determinam-se as diferentes massas: peso principal (p. ex. balde com água) $m_H = 5,22$ kg
contrapeso (na corda) $m_C = 0,019$ kg
cilindro de alumínio $m_A = 0,249$ kg

Outras grandezas que devem ser medidas com antecedência:

temperatura ambiente $T_U = 23,2^\circ\text{C}$
diâmetro do cilindro na superfície de atrito $D_R = 45,75$ mm

- Após o esfriamento do cilindro de atrito este é aparafusado no suporte, o sensor de temperatura é colocado e a corda é enrolada no cilindro (comparar parágrafo 4). Após alguns minutos, que devem passar para que a temperatura se distribua de forma homogênea, a resistência do sensor de temperatura é de $R_1 = 8,00$ k Ω (equivalente a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ conforme equação 1).
- Após controlar o ponto zero do contador, é iniciada a experiência acionando a manivela e assim é levantado o peso principal do chão. Agora o contrapeso desce ao chão, pelo que a corda se distende levemente e exerce menos atrito sobre o cilindro. O

peso principal mantém a sua altura e deveria mantê-la durante toda a duração da experiência.

- Após $n = 460$ rotações a experiência é finalizada e o valor da resistência é lido:
 $R_2 = 3,99$ k Ω ($T_2 = 30,26^\circ\text{C}$).
- Já que a temperatura ainda aumenta por uns instantes após o encerramento da experiência (homogeneização da distribuição da temperatura), anota-se como valor de medição o valor mínimo da medição de resistência obtido vários segundos após ter encerrado a experiência. Depois, a resistência volta a subir, já que por causa da troca de calor com o ambiente, a temperatura do cilindro cai.

6.1.2 Análise da experiência

O trabalho W é definido como produto da força F e o percurso s

$$W = F \cdot s \quad (2)$$

No atrito, age a força

$$F = m_A \cdot g \quad (3)$$

(g é a força de gravidade) ao longo do percurso

$$s = n \cdot \pi \cdot D_R \quad (4)$$

- A aplicação das equações 3 e 4 em 2 produz:

$$W = m_A \cdot g \cdot n \cdot \pi \cdot D_R = 5,22 \cdot 9,81 \cdot 460 \cdot 3,1416 \cdot 0,04575 = 3386 \text{ Nm} \quad (5)$$

O calor ΔQ acumulado no cilindro resulta da diferença de temperatura ($T_2 - T_1$) e a capacidade térmica específica indicada no parágrafo 3 em:

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,26 - 14,60) \text{ KJ} = 3353 \text{ J} \quad (6)$$

Neste exemplo, o desvio entre o trabalho mecânico e o calor não passa de aprox. 1%. Por causa de tolerâncias inevitáveis da composição do alumínio (o alumínio puro é muito mole e é quase impossível de se trabalhar mecanicamente, por isso sempre são utilizadas ligas) a capacidade térmica específica pode variar sensivelmente. Ela deve ser determinada para cada cilindro de atrito individualmente. O modo mais fácil de fazer isto é por meio de aquecimento elétrico e com a premissa da equivalência do calor e da energia elétrica.

6.2 Transformação da energia elétrica em calor

6.2.1 Execução da experiência

- Após o esfriamento do cilindro de atrito, este é aparafusado no suporte (mesmas condições experimentais que na experiência do atrito) e o sensor de temperatura é instalado. Após alguns minutos, que devem passar para que a temperatura se distribua de forma homogênea, a resistência do sensor de temperatura é de $R_1 = 8,00$ k Ω (equivalente a $T_1 = 14,60^\circ\text{C}$ conforme equação 1).

- Agora o aparelho de alimentação elétrica, que já foi ajustado, (veja parágrafo 4) é conectado ao elemento aquecedor e um cronômetro é lançado. Tensão e corrente (indicações no aparelho de alimentação) são anotadas:
 $U = 11,4 \text{ V}; I = 1,0 \text{ A}$
- Depois de $t = 300 \text{ s}$ a experiência é concluída e o valor da resistência é lido:
 $R_2 = 3,98 \text{ k}\Omega$ ($T_2 = 30,32^\circ\text{C}$)
 Igualmente capta-se a variação (mínima) da tensão:
 $U = 11,0 \text{ V}$.

6.2.2 Análise da experiência

A energia elétrica E é o produto da potência P e do tempo t . A potência, é o produto da tensão e da corrente. Portanto, é válido (cálculo com o valor médio da tensão):

$$E = U \cdot I \cdot t = 11,2 \cdot 1,0 \cdot 300 = 3360 \text{ Ws} \quad (7)$$

Nesta experiência, o calor aportado é de

$$\Delta Q = c_A \cdot m_A \cdot (T_2 - T_1) = 0,86 \cdot 0,249 \cdot (30,32 - 14,60) \text{ KJ} = 3366 \text{ J} \quad (8)$$

Também aqui, a coincidência entre E e ΔQ muito boa.

Relação entre resistência e temperatura no sensor de temperatura

$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$	$R / \text{k}\Omega$	$T / ^\circ\text{C}$
7,86	14,97	6,78	18,19	5,70	22,05	4,62	26,84	3,54	33,10
7,84	15,03	6,76	18,26	5,68	22,13	4,60	26,94	3,52	33,24
7,82	15,08	6,74	18,32	5,66	22,21	4,58	27,04	3,50	33,38
7,80	15,14	6,72	18,39	5,64	22,29	4,56	27,14	3,48	33,51
7,78	15,19	6,70	18,45	5,62	22,37	4,54	27,24	3,46	33,65
7,76	15,25	6,68	18,52	5,60	22,45	4,52	27,35	3,44	33,79
7,74	15,31	6,66	18,58	5,58	22,53	4,50	27,45	3,42	33,93
7,72	15,36	6,64	18,65	5,56	22,61	4,48	27,55	3,40	34,07
7,70	15,42	6,62	18,72	5,54	22,69	4,46	27,66	3,38	34,22
7,68	15,47	6,60	18,78	5,52	22,77	4,44	27,76	3,36	34,36
7,66	15,53	6,58	18,85	5,50	22,85	4,42	27,87	3,34	34,50
7,64	15,59	6,56	18,92	5,48	22,94	4,40	27,97	3,32	34,65
7,62	15,64	6,54	18,99	5,46	23,02	4,38	28,08	3,30	34,79
7,60	15,70	6,52	19,05	5,44	23,10	4,36	28,18	3,28	34,94
7,58	15,76	6,50	19,12	5,42	23,19	4,34	28,29	3,26	35,09
7,56	15,81	6,48	19,19	5,40	23,27	4,32	28,40	3,24	35,24
7,54	15,87	6,46	19,26	5,38	23,35	4,30	28,51	3,22	35,39
7,52	15,93	6,44	19,33	5,36	23,44	4,28	28,62	3,20	35,54
7,50	15,99	6,42	19,40	5,34	23,52	4,26	28,72	3,18	35,69
7,48	16,05	6,40	19,46	5,32	23,61	4,24	28,83	3,16	35,84
7,46	16,10	6,38	19,53	5,30	23,69	4,22	28,95	3,14	36,00
7,44	16,16	6,36	19,60	5,28	23,78	4,20	29,06	3,12	36,15
7,42	16,22	6,34	19,67	5,26	23,87	4,18	29,17	3,10	36,31
7,40	16,28	6,32	19,74	5,24	23,95	4,16	29,28	3,08	36,47
7,38	16,34	6,30	19,81	5,22	24,04	4,14	29,39	3,06	36,63
7,36	16,40	6,28	19,88	5,20	24,13	4,12	29,51	3,04	36,79
7,34	16,46	6,26	19,95	5,18	24,21	4,10	29,62	3,02	36,95
7,32	16,52	6,24	20,03	5,16	24,30	4,08	29,74	3,00	37,11
7,30	16,57	6,22	20,10	5,14	24,39	4,06	29,85	2,98	37,28
7,28	16,63	6,20	20,17	5,12	24,48	4,04	29,97	2,96	37,44
7,26	16,69	6,18	20,24	5,10	24,57	4,02	30,09	2,94	37,61
7,24	16,75	6,16	20,31	5,08	24,66	4,00	30,20	2,92	37,78
7,22	16,81	6,14	20,39	5,06	24,75	3,98	30,32	2,90	37,94
7,20	16,88	6,12	20,46	5,04	24,84	3,96	30,44	2,88	38,11
7,18	16,94	6,10	20,53	5,02	24,93	3,94	30,56	2,86	38,29
7,16	17,00	6,08	20,60	5,00	25,02	3,92	30,68	2,84	38,46
7,14	17,06	6,06	20,68	4,98	25,11	3,90	30,80	2,82	38,63
7,12	17,12	6,04	20,75	4,96	25,21	3,88	30,92	2,80	38,81
7,10	17,18	6,02	20,83	4,94	25,30	3,86	31,04	2,78	38,99
7,08	17,24	6,00	20,90	4,92	25,39	3,84	31,17	2,76	39,17
7,06	17,30	5,98	20,97	4,90	25,48	3,82	31,29	2,74	39,35
7,04	17,37	5,96	21,05	4,88	25,58	3,80	31,42	2,72	39,53
7,02	17,43	5,94	21,12	4,86	25,67	3,78	31,54	2,70	39,71

7,00	17,49	5,92	21,20	4,84	25,77	3,76	31,67	2,68	39,90
6,98	17,55	5,90	21,28	4,82	25,86	3,74	31,79	2,66	40,08
6,96	17,62	5,88	21,35	4,80	25,96	3,72	31,92	2,64	40,27
6,94	17,68	5,86	21,43	4,78	26,05	3,70	32,05	2,62	40,46
6,92	17,74	5,84	21,50	4,76	26,15	3,68	32,18	2,60	40,65
6,90	17,81	5,82	21,58	4,74	26,25	3,66	32,31	2,58	40,84
6,88	17,87	5,80	21,66	4,72	26,34	3,64	32,44	2,56	41,04
6,86	17,93	5,78	21,74	4,70	26,44	3,62	32,57	2,54	41,23
6,84	18,00	5,76	21,81	4,68	26,54	3,60	32,70	2,52	41,43
6,82	18,06	5,74	21,89	4,66	26,64	3,58	32,84	2,50	41,63
6,80	18,13	5,72	21,97	4,64	26,74	3,56	32,97	2,48	41,83

