

## Gebrauchsanweisung Wärmeäquivalentgerät Kupferzylinder

Martin Henschke, 2004-06-22

Art.-Nr.: 650268

Art.-Nr.: 650276

Diese Gebrauchsanweisung ist urheberrechtlich geschützt. Sie darf - mit Quellenangabe - für nicht-kommerzielle Zwecke vervielfältigt, aber nicht über das Internet weiterverteilt werden. Technische Änderungen vorbehalten.

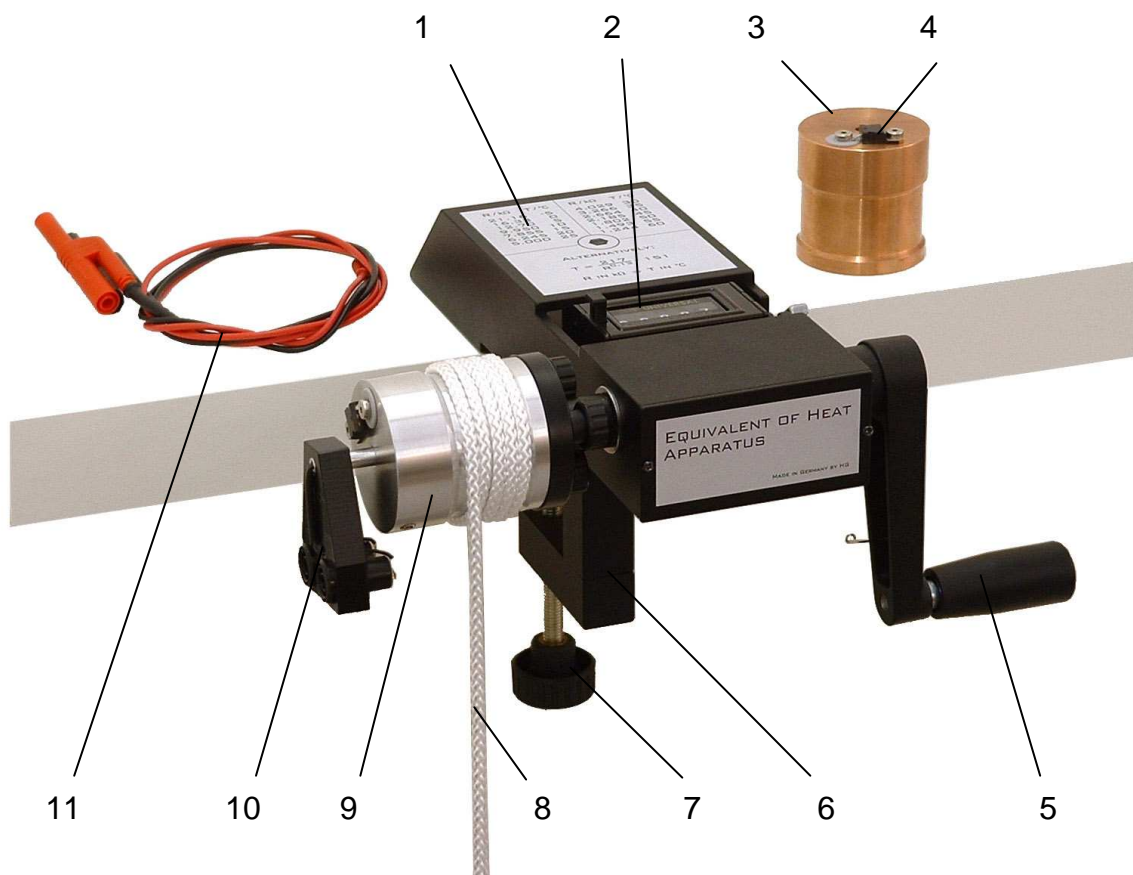


Abb. 1: Komponenten

- |                            |  |
|----------------------------|--|
| 1 Träger mit R → T Tabelle | 2 Zählwerk                                     |
| 3 Kupferzylinder (650276)  | 4 elektrisches Heizelement                     |
| 5 Handkurbel               | 6 Tischklemme                                  |
| 7 Rändelschraube           | 8 Reibschnur mit Gegengewicht (nicht sichtbar) |
| 9 Aluminiumzylinder        | 10 Temperaturfühler                            |
| 11 Adapterkabel            | 12 Eimer, 5l (nicht sichtbar)                  |

Mit dem Wärmeäquivalentgerät kann mechanische Arbeit (Nm) und elektrische Energie (Ws) in Wärme (J) umgewandelt werden. Die Auswertung zeigt die Äquivalenz aller drei Energieformen.

## 1. Sicherheitshinweise

**Verletzungsgefahr!** Das an der Reibschnur (8) 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 9) erwärmt. Es ist darauf zu achten, dass die Temperatur nicht über ca. 40 °C ansteigt. Der maximal zulässige Strom im Heizelement beträgt 2 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, technische Daten

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.

**Technische Daten der Reibzylinder** (ca. Angaben):

Durchmesser  $D = 48$  mm

Höhe  $H = 50$  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.

## 3. Bedienung und Wartung

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 kΩ bis 9 kΩ 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 kΩ einzusetzen, um  $T$  in °C zu erhalten. Diese Gleichung stimmt mit den Tabellenangaben des Herstellers von dem NTC-Widerstand im Bereich von 10 - 40 °C auf ±0,05 °C überein.

Vor einem Versuch sollte der Reibzylinder um ca. 5 - 10 °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 °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.

### **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.

## 4. Versuchsdurchführung und Auswertung

### 4.1 Umwandlung mechanischer Arbeit in Wärme

#### 4.1.1 Versuchsdurchführung

Zuerst werden die verschiedenen Massen bestimmt:

Hauptgewicht (z. B. Eimer mit Wasser)  $m_H = 5,22 \text{ kg}$

Gegengewicht (an Reibschnur)  $m_G = 0,019 \text{ kg}$

Aluminiumzylinder  $m_A = 0,249 \text{ kg}$

Weitere Größen, die vorab gemessen werden sollten:

Umgebungstemperatur  $T_U = 23,2 \text{ °C}$

Durchmesser des Zylinders an der Reibfläche  $D_R = 45,75 \text{ mm}$

Nach der Abkühlung des Reibzylinders wird dieser an den Träger geschraubt, der Temperaturfühler eingesteckt und die Reibschnur um den Zylinder gelegt (vergl. Abschnitt 3). Nach ein paar Minuten, die zur homogenen Temperaturverteilung verstreichen sollten, beträgt der Widerstand des Temperaturfühlers  $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$  (entsprechend  $T_1 = 14,60 \text{ °C}$  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:  $R_2 = 3,99 \text{ k}\Omega$  ( $T_2 = 30,26 \text{ °C}$ ). 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.

#### 4.1.2 Versuchsauswertung

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

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

Bei der Reibung wirkt die Kraft

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

( $g$  ist die Erdbeschleunigung) entlang des Weges

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

Einsetzen der Gln. 3 und 4 in 2 liefert:

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

Die im Reibzylinder gespeicherte Wärme  $\Delta Q$  ergibt sich aus der der Temperaturdifferenz ( $T_2 - T_1$ ) und der in Abschnitt 2 angegebenen spezifischen Wärmekapazität zu:

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

In diesem Beispiel beträgt die Abweichung zwischen mechanischer Arbeit und Wärme nur etwa 1%. Durch unvermeidbare Toleranzen in der Material-Zusammensetzung (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.

## 4.2 Umwandlung elektrischer Energie in Wärme

### 4.2.1 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  $R_1 = 8,00 \text{ k}\Omega$  (entsprechend  $T_1 = 14,60 \text{ }^\circ\text{C}$  nach Gl. 1).

Jetzt wird das vorab eingestellte Netzgerät (siehe Abschnitt 3) an das Heizelement angeschlossen und eine Stoppuhr gestartet. Spannung und Strom (Anzeige am Netzgerät) werden notiert:  $U = 11,4 \text{ V}$ ,  $I = 1,00 \text{ A}$

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

### 4.2.2 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):

$$E = U I t = 11,2 \times 1,00 \times 300 = 3360 \text{ Ws} . \quad (7)$$

In diesem Versuch beträgt die zugeführte Wärme

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

Auch hier ist die Übereinstimmung zwischen  $E$  und  $\Delta Q$  sehr gut.

## Zusammenhang zwischen Widerstand und Temperatur beim Temperaturfühler

R / kΩ	T / °C	R / kΩ	T / °C	R / kΩ	T / °C	R / kΩ	T / °C	R / kΩ	T / °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