

## Wärmeleitung

### MESSUNG DER WÄRMELEITUNG IN METALLSTÄBEN

- Messung des Temperaturverlaufes längs einseitig geheizten und einseitig gekühlten Metallstäben im nichtstationären und stationären Zustand.
- Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Stabmaterials.
- Messung des Wärmestroms im stationären Zustand.

UE2020100

02/25 UD

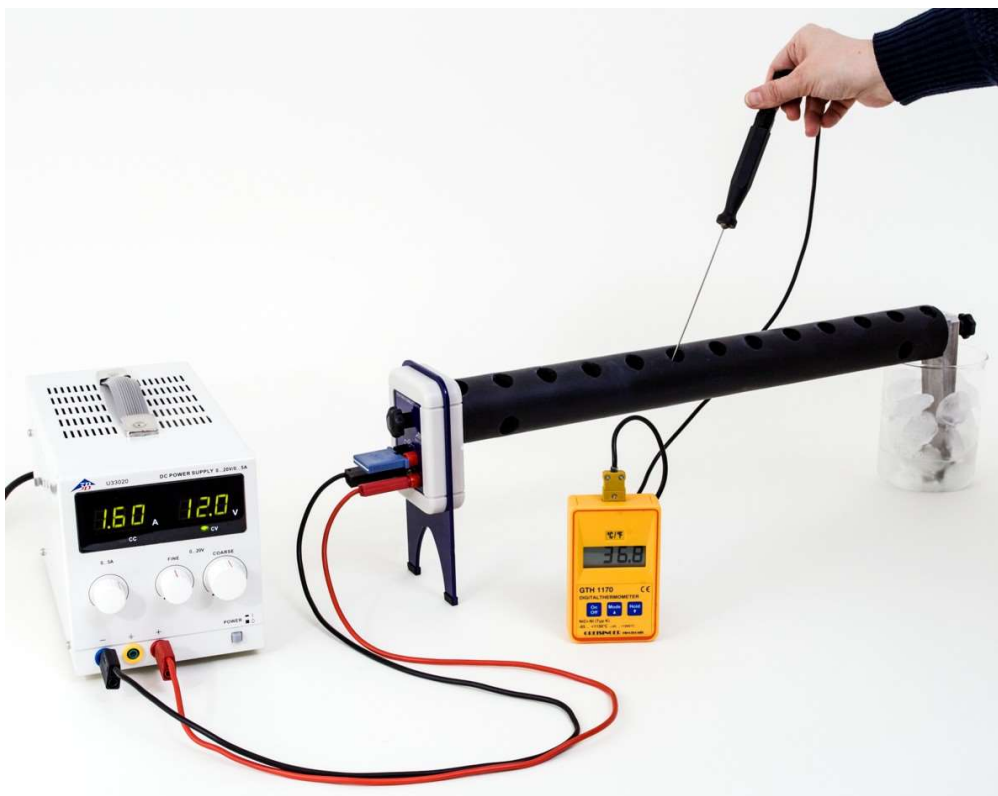


Fig. 1: Messanordnung

### ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Wärme kann durch Wärmeleitung, Wärmestrahlung und Konvektion von einem wärmeren in einen kälteren Bereich übertragen werden. Bei der Wärmeleitung findet dieser Energietransport durch die Wechselwirkung zwischen benachbarten Atomen oder Molekülen statt, ohne dass diese selbst transportiert werden. Bei der Erwärmung z.B. eines Metallstabes schwingen die Atome am warmen Ende

stärker, d.h. mit einer höheren Energie als am kalten Ende. Die Energie wird durch Stöße mit benachbarten Atomen an diese abgegeben und so durch den Stab geleitet. Metalle sind besonders gute Wärmeleiter, da noch Stöße zwischen freien Elektronen und Atomen hinzukommen.

In einem Stab mit der Querschnittsfläche  $A$ , dessen Enden auf unterschiedlichen Temperaturen gehalten werden, stellt sich nach einiger Zeit ein Temperaturgradient entlang des Stabes ein, so dass die Temperatur  $T$  gleichmäßig zum kälteren Ende hin abnimmt. Dabei fließt in einer Zeit  $dt$  eine Wärmemenge  $dQ$  durch den Querschnitt des Stabes, und es stellt sich ein konstanter Wärmestrom  $P_Q$  ein:

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Wärmestrom (gemessen in Watt)  
 $A$ : Querschnittsfläche des Stabes  
 $\lambda$ : Wärmeleitfähigkeit des Stabmaterials  
 $T$ : Temperatur  
 $x$ : Ortskoordinate entlang des Stabes

Bevor der konstante Temperaturgradient erreicht ist, hat der Stab zur Zeit  $t$  eine Temperaturverteilung  $T(x,t)$ , die sich allmählich dem stationären Zustand nähert. Es gilt die Differentialgleichung

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : spezifische Wärmekapazität  
 $\rho$ : Dichte des Stabmaterials

Im stationären Fall ist in Übereinstimmung mit Gl. (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ und } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

Im Experiment wird der Stab an einem Ende elektrisch geheizt. Eine elektronisch geregelte Wärmequelle speist den Wärmeleitstab mit einem Wärmestrom, der als elektrische Leistung

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

durch Messung der Heizspannung  $U$  und des Heizstromes  $I$  bestimmt werden kann. Die elektronische Regelung des Stromes sorgt dafür, dass das Stabende sehr schnell eine Temperatur von etwa  $90^\circ\text{C}$  erreicht, die dann konstant gehalten wird.

Über die Kühllamellen wird die Wärme am anderen Stabende an Eiswasser oder einfach an Wasser bei Raumtemperatur abgeführt. Die abgeführte Wärmeleistung kann also kalorimetrisch bestimmt werden.

Eine Isoliermanschette verringert die Wärmeabgabe des Wärmeleitstabes an die Umgebung und verbessert die Linearität des Temperaturprofils im stationären Zustand. Mit einem sekundenschnellen elektronischen Thermometer werden die Temperaturen an den vorgesehenen Messstellen längs des Stabes gemessen. Es stehen ein Kupferstab und ein Aluminiumstab zur Verfügung.

## GERÄTELISTE

1	Gerätesatz Wärmeleitung	1017329
1	Wärmeleitstab Aluminium	1017331
1	Wärmeleitstab Kupfer	1017330
1	DC-Netzgerät 0 – 20 V, 0 – 5 A @230 V	1003312
	oder	
1	DC-Netzgerät 0 – 20 V, 0 – 5 A @115 V	1003311
1	Digital-Sekunden-Taschenthermometer	1023780
1	Tauchfühler NiCr-Ni Typ K -65–550°C	1002804
1	Sicherheitsexperimentierkabel, 75cm, rot, blau (2 Stk.)	1017718
1	Becherglas 500 ml niedrige Form	1025691
	Zusätzlich empfohlen:	
2	Digital-Multimeter P1035	1002781
	Eiswasser	

## AUFBAU UND DURCHFÜHRUNG

### Hinweis:

Das Experiment wird beispielhaft mit dem Aluminium-Wärmeleitstab durchgeführt.

- Wärmeleitstab an den Schnittflächen säubern und hauchdünn mit Wärmeleitpaste bestreichen.
- Wärmemodul mittels Befestigungsschraube an den Wärmeleitstab anschrauben; Stab so ausrichten, dass die Bohrungen (Temperaturmessstellen) nach oben zeigen.
- Isoliermanschette über den Wärmeleitstab schieben und Aussparungen des Schaumstoffes über den Temperaturmessstellen ausrichten.
- Lamellenpaar am Stabende mit Befestigungsschraube locker anschrauben, im Kühlgefäß (Becherglas) ausrichten und dann fest anziehen.
- Becherglas mit Eiswasser füllen und dieses ggf. im Verlauf des Experiments erneuern.
- Zur Stromversorgung das DC-Netzgerät über die Anschlussbuchsen anschließen. Dabei unbedingt die Polarität beachten: Rot = Pluspol. Das zweite Buchsenpaar mittels des Kurzschlusssteckers überbrücken.
- Zur Messung des Heizstroms statt des Kurzschlusssteckers ein Strommessgerät an das obere Buchsenpaar anschließen.
- Für eine möglichst genaue Ermittlung der aufgenommenen elektrischen Leistung (Produkt aus Heizspannung und -strom) die Heizspannung direkt am Heizmodul über das untere Buchsenpaar messen und nicht am Stromversorgungsgerät ablesen.
- Die Temperatur mit einem elektronischen Thermometer (sekundenschneller Fühler mit Thermoelement) in möglichst gleichen Zeitintervallen an den Messstellen 1 bis 13 im Wärmeleitstab messen (Tab. 1). Dazu vorher eine kleine Menge Wärmeleitpaste in die Messstellen einbringen.
- Mehrere Messreihen z.B. mit einem Zeitabstand von 150 s bis zum Erreichen des stationären Zustandes durchführen (Tab. 1).

**MESSBEISPIEL**

Heizspannung  $U$ : 12 V  
 Heizstrom  $I$ : 1,6 A

Tab. 1: Messstellen  $N$ , Abstände der Messstellen  $x$  und Temperaturen  $T$  an den Messstellen für fünf verschiedene Messreihen mit einem Zeitabstand von 150 s

$N$	$x / \text{cm}$	$T / ^\circ\text{C}$				
		$t = 0 \text{ s}$	$t = 150 \text{ s}$	$t = 300 \text{ s}$	$t = 350 \text{ s}$	$t = 400 \text{ s}$
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

**AUSWERTUNG**

- Die Messreihen aus Tab. 1 in einem  $T(N)$  – Diagramm graphisch darstellen (Fig. 2).

Die Messpunkte nähern sich mit der Zeit einem linearen Verlauf an, der das Erreichen des stationären Zustands widerspiegelt.

- Die Temperaturen der Messreihe für  $t = 400 \text{ s}$  aus Tab. 1 gemäß

$$(5) \quad K = ^\circ\text{C} + 273,15 = \frac{(^{\circ}\text{F} + 459,67)}{1,8}$$

in Kelvin umrechnen, in Abhängigkeit des Abstandes  $x$  graphisch darstellen und eine Gerade an die Messpunkte anpassen (Fig. 3).

Für die Geradensteigung  $k$  ergibt sich:

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}}$$

Die Geradensteigung  $k$  entspricht dem Temperaturgradienten in Gleichung (1):

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Zunächst wird unter der vereinfachten Annahme, dass der Wärmestrom  $P_Q$  der elektrischen Leistung  $P_{el}$  entspricht, die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  bestimmt. Aus (7) folgt:

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

Der aus der Messung bestimmte Wert weicht um ca. 30% vom Literaturwert  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  ab.

Tatsächlich entspricht der Wärmestrom  $P_Q$  der elektrischen Leistung  $P_{el}$  abzüglich einer Verlustleistung  $P_l$ :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_l$$

Also ist:

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_l}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_l = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Für die Verlustleistung folgt daraus mit dem Literaturwert  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ :

$$(11) \quad P_l = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 236 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

**Hinweis zur Messung des Wärmestroms im stationären Zustand:**

Verwendet man anstatt des Eiswassers im Becherglas Wasser bei Raumtemperatur in einem ausreichend wärmeisolierten Gefäß, kann der Wärmestrom  $P_Q$  über die in einer Zeit  $dt$  an das Wasser abgeführte Wärmemenge  $dQ$  kalorimetrisch bestimmt werden:

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot dT\} = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{\text{H}_2\text{O}}$ : spezifische Wärmekapazität von Wasser

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ : Masse des Wassers

$dT/dt$ : Temperaturzunahme des Wassers in der Zeit  $dt$

Die Temperaturzunahme des Wassers innerhalb einer bestimmten Zeit kann direkt gemessen werden. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  unter Berücksichtigung der Verlustleistung folgt dann direkt aus Gleichung (7) mit der Geradensteigung  $k$  aus (6).

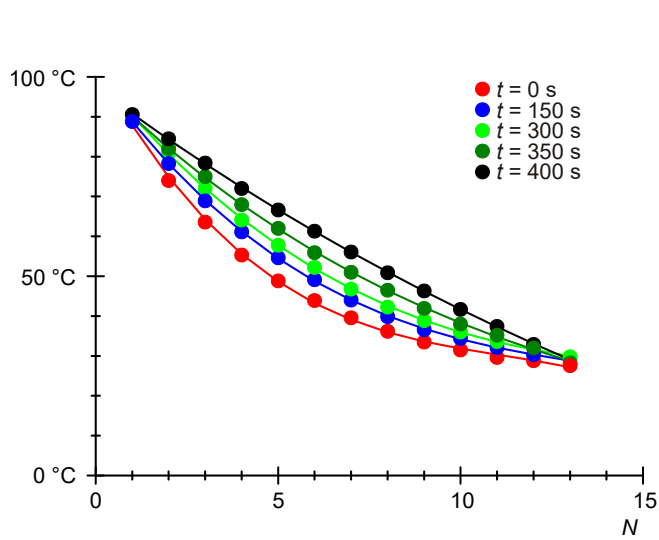


Fig. 2: Temperaturen längs des Aluminiumstabes in fünf Messreihen mit einem Zeitabstand von 150 s

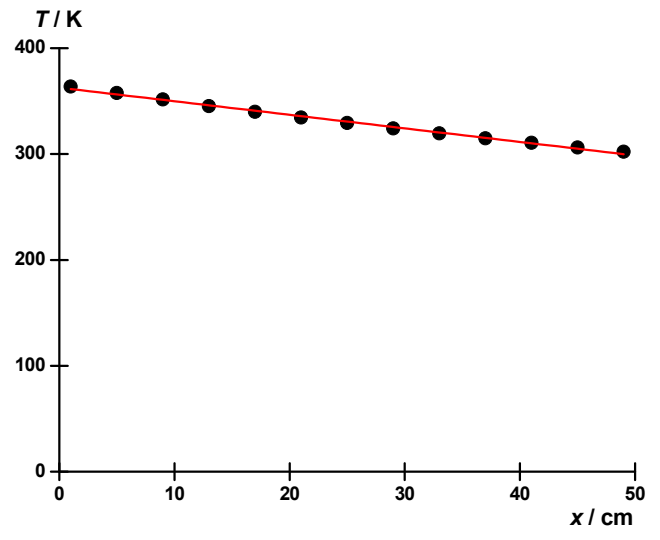


Fig. 3: Temperatur  $T$  in Abhängigkeit des Abstandes  $x$  der Messstellen im stationären Zustand

## Heat Conduction

### MEASURE CONDUCTION OF HEAT IN METAL BARS

- Measure how temperature changes with time along metal bars which are heated at one end but remain cool at the other in both dynamic and steady states.
- Measure the flow of heat in the steady state.
- Determine the heat conductivity of the material from which the bar is made.

UE2020100

02/25 UD



Fig. 1: Measurement set-up

### GENERAL PRINCIPLES

Heat can be transported from a hotter area to a colder one by conduction, radiation or convection. Conduction of heat involves heat being transferred from a hotter part of an object to a colder area by means of the interaction between neighbouring atoms or molecules, although the atoms themselves remain in place. For instance, when a metal bar is heated, the atoms at the hotter end vibrate

more vigorously than those at the cooler end, i.e. they vibrate with more energy. Energy is transferred due to collisions between neighbouring atoms, passing the energy from one atom to another and thereby conducting it along the bar. Metals are particularly good conductors of heat since collisions also occur between atoms and free electrons.

In a bar with a cross-sectional area of  $A$ , when the ends are maintained at different temperatures, after a while a temperature gradient emerges along the bar, whereby the temperature decreases uniformly along the length towards the cold end. In a time period  $dt$  a quantity of heat  $dQ$  flows through the cross-section of the bar and there arises a constant flow of heat  $P_Q$ :

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Flow of heat (measured in watts)

$A$ : Cross-sectional area of bar

$\lambda$ : Heat conductivity of material from which the bar is made

$T$ : Temperature

$x$ : Coordinate of length along the bar

Before the constant temperature gradient arises, the temperature distribution at a specific time  $t$  is given by  $T(x,t)$ , which gradually becomes closer to the steady state. The following differential equation then applies

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : Specific heat capacity

$\rho$ : Density of material from which bar is made

In the steady state the situation is in agreement with equation (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ and } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

In this experiment the bar is heated at one end by electrical means. An electronically regulated source of heat provides the bar with an amount of heat which can be determined by measuring the heater voltage  $U$  and current  $I$ :

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

Electronic regulation of the current ensures that this end of the bar rapidly reaches a temperature of about 90°C and this temperature is then maintained constant.

The other end of the bar is kept at the temperature of melting ice or simply water at room temperature via its cooling baffles. This allows the heating to be determined by calorimetry.

An insulating sleeve minimises the loss of heat from the bar to its surroundings and ensures the temperature profile is more linear in the steady state. Using an electronic thermometer that determines temperature within a second, temperatures are measured at pre-defined measurement points along the bar. Both a copper bar and an aluminium bar are provided.

## LIST OF EQUIPMENT

1 Heat Conduction Equipment Set	1017329
1 Heat Conducting Rod, Aluminium	1017331
1 Heat Conducting Rod, Copper	1017330
1 DC Power Supply 20 V, 5 A @230 V	1003312
or	
1 DC Power Supply 20 V, 5 A @115 V	1003311
1 Digital Quick Response Pocket Thermometer	1023780
1 K-Type NiCr-Ni Immersion Sensor, -65–550°C	1002804
1 Safety Experimental Leads, 75 cm, blue, red (2 pcs)	1017718
1 Beaker 500 ml low form	1025691
Additionally recommended:	
2 Digital Multimeters P1035	1002781
Ice water	

## SET-UP AND PROCEDURE

### Note:

The experiment is described using the aluminium heat conducting bar as an example.

- Clean the ends of the conducting bar where it will make contact and smear a very thin coating of thermal conducting paste on them.
- Attach the heater module to the bar by means of securing screws, aligning the bar in such a way that the holes in it for measuring the temperature are facing upwards.
- Slide the insulating sleeve over the conducting bar, lining up the gaps in the foam over the temperature measurement holes.
- Loosely screw on the pair of baffles at the end of the bar, line them up inside the cooling vessel (glass beaker) and then screw them on tight.
- Fill the beaker with ice water, topping it up if necessary during the course of the experiment.
- To provide the power, connect the plug-in DC power supply to the power terminals, making sure that the polarity is correct: red = positive pole. The second pair of sockets should be shorted together with a jumper.
- To measure the current flowing through the heater, connect an ammeter between the two upper sockets instead of the jumper.
- To determine the electrical power consumed as accurately as possible (the product of the heater voltage and heater current), the voltage should be measured directly across the heater module via the lower pair of sockets and not read from the power supply.
- The temperature should be measured with an electronic thermometer (quick-response pocket thermometer with thermocouple) at measurement points 1 to 13 along the conducting bar at time intervals as equal as possible (Table 1). Smear a small amount of conducting paste at the measurement points in advance for this purpose.
- Carry out several sets of measurements, e.g. starting at 150 s till a steady state has been reached (Table 1).

### SAMPLE MEASUREMENT

Heater voltage  $U$ : 12 V  
 Heater current  $I$ : 1.6 A

Table 1: Measurement points  $N$ , distance between measurement points  $x$  and temperatures  $T$  at measurement points for five different sets of measurements at time intervals of 150 seconds and 50 seconds

$N$	$x / \text{cm}$	$T / ^\circ\text{C}$				
		$t = 0 \text{ s}$	$t = 150 \text{ s}$	$t = 300 \text{ s}$	$t = 350 \text{ s}$	$t = 400 \text{ s}$
1	1	88.7	88.8	90.0	90.0	90.6
2	5	74.0	78.3	81.0	82.0	84.5
3	9	63.6	68.9	72.0	75.0	78.4
4	13	55.3	61.1	64.1	68.0	72.0
5	17	48.8	54.6	57.8	62.0	66.6
6	21	43.9	49.1	52.2	55.9	61.3
7	25	39.6	44.0	46.8	51.0	56.1
8	29	36.2	39.9	42.3	46.5	50.9
9	33	33.5	36.6	38.9	41.9	46.3
10	37	31.5	34.4	36.0	38.0	41.7
11	41	29.6	32.1	33.6	35.2	37.4
12	45	28.8	30.3	31.8	32.0	32.9
13	49	27.6	28.8	29.8	28.3	29.1

### EVALUATION

- Plot the sets of measurements in Table 1 in a graph of  $T$  against  $N$  (Fig. 2).

Over a period of time, the measurement points settle down to a linear gradient along the bar, which corresponds to a settled, steady state.

- Convert the temperatures for time  $t = 400 \text{ s}$  in Table 1 to Kelvin as follows:

$$(5) \text{ K} = ^\circ\text{C} + 273.15 = \frac{(^{\circ}\text{F} + 459.67)}{1.8}$$

Plot the temperatures against the distances  $x$  along the bar and fit a straight line to the measurement points (Fig. 3).

The following results for gradient  $k$ :

$$(6) \text{ k} = -1.28 \frac{\text{K}}{\text{cm}}$$

Gradient  $k$  corresponds to the temperature gradients in equation(1):

$$(7) \text{ k} = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Initially make the simplified assumption that the power associated with the flow of heat  $P_Q$  is identical to the electrical power  $P_{el}$  consumed and work out the thermal conductivity  $\lambda$ . The following can be deduced from equation (7):

$$(8) \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1.6 \text{ A}}{-1.28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

The value determined by measurement differs by about 30% from that quoted in literature,  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

In fact the flow of heat  $P_Q$  is really equal to the electrical power provided  $P_{el}$  with power losses  $P_l$  subtracted:

$$(9) P_Q = P_{el} - P_l$$

Therefore:

$$(10) \lambda = -\frac{P_{el} - P_l}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_l = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Thus if the value quoted in literature is  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ , then it follows that the power losses are as seen below:

$$(11) P_l = 12 \text{ V} \cdot 1.6 \text{ A} - 1.28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 236 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4.4 \text{ W}$$

**Note: Measurement of flow of heat in steady state:**

If instead of using ice water in the beaker, water at room temperature is used and the vessel suitably insulated, then the flow of heat  $P_Q$  can be determined calorimetrically from the heat  $dQ$  transferred over to the time interval  $dt$ :

$$(12) P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot dT\} = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{H_2O}$ : Specific heat capacity of water

$m_{H_2O}$ : Mass of water

$dT/dt$ : Increase in water temperature over time  $dt$

The increase in water temperature over a given period can be measured directly. The thermal conductivity  $\lambda$  taking into account losses in power then follows directly from equation (7) with the gradient  $k$  from equation (6).

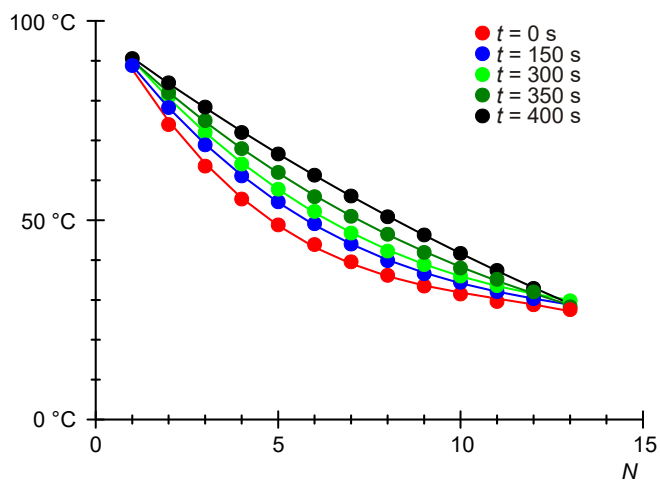


Fig. 2: Temperatures along the aluminium rod in five sets of measurements made at time intervals of 150 s

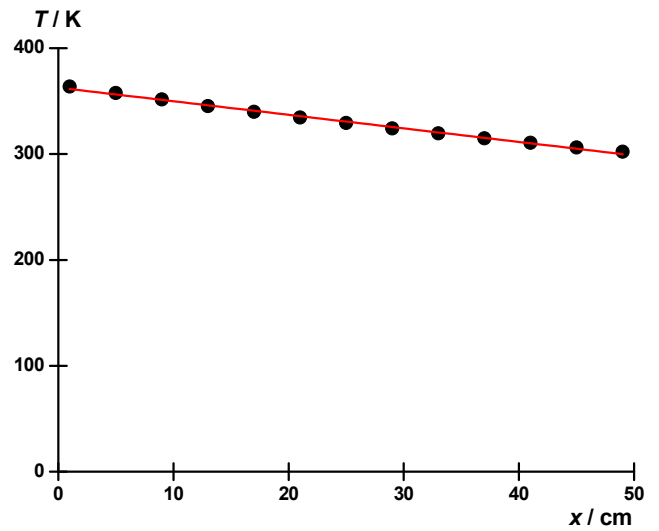


Fig. 3: Temperature  $T$  in as a function of distance  $x$  to measurement points in steady state



## Conducción del calor

### MEDICIÓN DE LA CONDUCCIÓN DEL CALOR EN BARRAS METÁLICAS

- Medición del curso de la temperatura a lo largo de barras metálicas calentadas y enfriadas unilateralmente, en estado no estacionario y en estado estacionario.
- Medición de la corriente de calor en el estado estacionario.
- Determinación de la conductividad calorífica del material de la barra.

UE2020100

02/25 UD

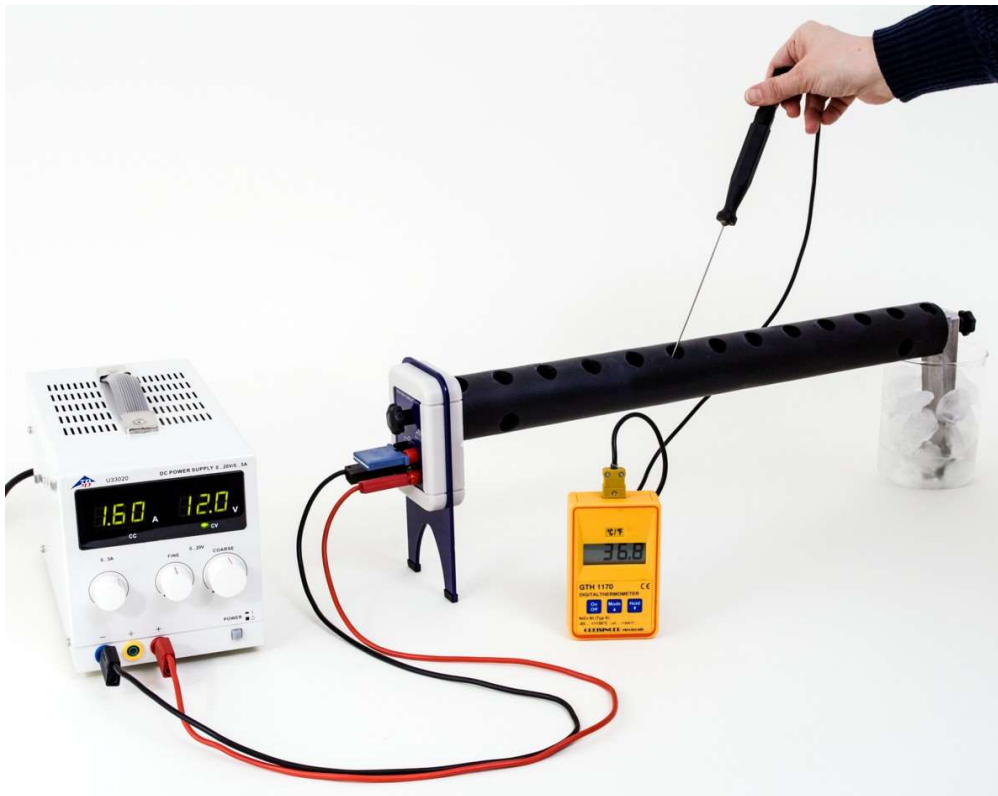


Fig. 1: Disposición de medición

### FUNDAMENTOS GENERALES

El calor puede ser transmitido por medio de conducción, radiación o convección desde una región más caliente hacia una más fría. En el caso de la conducción de calor, el transporte de energía tiene lugar por medio de la interacción entre átomos o moléculas vecinas sin que tenga lugar transporte de las mismas. En el calentamiento, p. ej. de una barra metálica, los átomos en el extremo más caliente

oscilan más intensamente, es decir, con más energía que en el extremo frío. La energía es entregada por medio de choques entre los átomos vecinos y conducida a través de la barra hacia el lado más frío. Metales son especialmente buenos conductores, porque se agregan además los choques entre los electrones libres y los átomos.

En una barra con una sección de área  $A$ , cuyos extremos se mantienen a temperaturas diferentes, se establece después de un tiempo un gradiente de temperatura a lo largo de la barra, así que la temperatura  $T$  decrece uniformemente hacia el extremo más frío, fluyendo en un tiempo  $dt$  una cantidad de calor  $dQ$  a través de la sección de la barra y se establece una corriente de calor constante  $P_Q$ :

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Corriente de calor (medida en Watt)

$A$ : Área de la sección de la barra

$\lambda$ : Capacidad calorífica del material de la barra

$T$ : Temperatura

$x$ : Coordinada espacial a lo largo de la barra

Antes de que se haya llegado al gradiente constante de temperatura, la barra tiene en el tiempo  $t$  una distribución de temperatura  $T(x,t)$  la cual se acerca poco a poco al estado estacionario. Es válida la ecuación diferencial:

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : Calor específico

$\rho$ : Densidad del material de la barra

En el caso estacionario, en concordancia con la ecuación (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ y } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

En el experimento se calienta eléctricamente la barra en un extremo. Una fuente de calor con regulación electrónica alimenta la barra de conducción calorífica con una corriente de calor que se puede determinar como potencia eléctrica

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

midiendo la tensión de caleo  $U$  y la corriente correspondiente  $I$ . La regulación electrónica de la corriente hace posible que el extremo de la barra llegue rápidamente hasta una temperatura de 90° C, la cual luego se mantiene constante.

Por medio de las láminas de enfriamiento, el calor en el otro extremo de la barra se elimina en agua de hielo o simplemente en agua corriente a temperatura ambiente. La potencia calorífica eliminada se puede determinar por mediciones calorimétricas.

Una camisa de aislamiento térmico reduce la entrega de calor de la barra de conducción de calor hacia el medio ambiente y mejora la linealidad del perfil térmico en el estado estacionario. Con un termómetro electrónico de rapidez secundaria se miden las temperaturas en los puntos de medición previstos a lo largo de la barra. Se tienen a disposición, una barra de cobre y una de aluminio.

## LISTA DE APARATOS

1	Juego de aparatos: Conducción de calor	1017329
1	Barra conductora del calor - Aluminio	1017331
1	Barra conductora del calor - Cobre	1017330
1	Fuente de alimentación CC, 0 – 20 V, 0 – 5 A @230 V	1003312
o		
1	Fuente de alimentación CC, 0 – 20 V, 0 – 5 A @115 V	1003311
1	Termómetro digital instantáneo de bolsillo	1023780
1	Sensor sumergible de NiCr-Ni, tipo K, -65 – 550°C	1002804

1	Cables experimental de seguridad, 75cm, azul, rojo (2 uds.)	1017718
1	Vaso de precipitados de forma baja 500 ml	1025691
Se recomienda adicionalmente:		
2	Multímetros digitales P1035	1002781
	Agua helada	

## MONTAJE Y REALIZACIÓN

### Observación:

El experimento se realiza tomando como ejemplo la barra conductora de calor de aluminio.

- La barra conductora de calor se limpia en sus secciones de corte y las secciones se untan de una capa muy delgada de pasta conductora de calor.
- El módulo calorífico se atornilla en la barra conductora de calor por medio de tornillos de fijación; la barra se orienta de tal forma que las perforaciones (puntos de medición de la temperatura) muestren todas hacia arriba.
- La camisa termoaislante se desliza sobre la barra conductora de calor y y las escotaduras de la camisa termoaislante de gomaespuma se ajustan sobre los puntos de medición de la temperatura.
- El par de laminillas al extremo de la barra se atornillan flojamente con el tornillo de fijación, se orientan en el recipiente de refrigeración (vaso de precipitados) y lu-ego se aprieta el tornillo.
- El vaso de precipitados se llena de agua de hielo y si es necesario se renueva en el curso del experimento.
- Para el suministro de corriente se conecta la fuente de alimentación de CC por medio de los caquillos de conexión, teniendo necesariamente cuidado de la polaridad: Rojo = Polo positivo. El segundo par de casquillos se puentea por medio de una clavija de cortocircuito.
- Para la medición de la corriente de caleo, en lugar de la clavija de cortocircuito se conecta un amperímetro en el par de casquillos de arriba.
- Para una determinación lo más exacta posible de la potencia eléctrica acogida (el producto de la tensión y la corriente de caldo) la tensión de caleo se mide directamente en el módulo calorífico por medio del par de casquillos de abajo y no se lee en el aparato de suministro de corriente.
- La temperatura se mide con un termómetro electrónico (sensor de rapidez secundaria y termopar) en lo posible, en intervalos de tiempo lo más iguales posible, en los puntos de medición de 1 a 13 (Tab 1), a lo largo de la barra conductora de calor. Para ello, se introduce una pequeña cantidad de pasta conductora de calor en los puntos de medición.
- Se realizan varias series de medición p. ej. en un intervalo de tiempo de 150 s hasta lograr el estado estacionario (Tab. 1).

## EJEMPLO DE MEDICIÓN

Tensión de caldeo  $U$ : 12 V  
 Corriente de caldeo  $I$ : 1,6 A

Tab. 1: Puntos de medición  $N$ , Distancias entre los puntos de medición  $x$  y temperaturas  $T$  en los puntos de medición para cinco diferentes series de mediciones con un intervalo de tiempo de 150 s

$N$	$x / \text{cm}$	$T / ^\circ\text{C}$				
		$t = 0 \text{ s}$	$t = 150 \text{ s}$	$t = 300 \text{ s}$	$t = 350 \text{ s}$	$t = 400 \text{ s}$
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

## EVALUACIÓN

- Se representan gráficamente las series de mediciones de la Tab. 1 en un diagrama  $T(N)$  (Fig. 2).

Los puntos de medida se acercan con el tiempo a un curso lineal, el cual refleja el logro del estado estacionario.

- Las temperaturas de la serie de mediciones para  $t = 400 \text{ s}$  de la Tab. 1 se convierten en Kelvin de acuerdo con

$$(5) \quad K = ^\circ\text{C} + 273,15 = \frac{(^{\circ}\text{F} + 459,67)}{1,8}$$

y se representan gráficamente en dependencia con la distancia  $x$  y se adapta una recta entre los puntos de medida (Fig. 3).

Para la pendiente de la recta  $k$  se obtiene:

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}}$$

La pendiente  $k$  de la recta corresponde al gradiente de temperatura en la ecuación (1):

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Primero, bajo la suposición simplificada de que la corriente calorífica  $P_Q$  corresponde a la potencia eléctrica  $P_{el}$ , determina la conductividad calorífica  $\lambda$ . De (7) se obtiene:

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$$

El valor determinado a partir de la medición difiere en aprox. 30% con respecto al valor bibliográfico  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

De hecho, la corriente calorífica  $P_Q$  corresponden a la potencia eléctrica  $P_{el}$ , restándole una pérdida de potencia  $P_I$ :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_I$$

Es decir que:

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_I}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_I = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Para la pérdida de potencia se obtiene, con el valor bibliográfico  $\lambda = 236 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ :

$$(11) \quad P_I = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{\text{K}}{\text{cm}} \cdot 236 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

### Observación para la medición de la corriente calorífica en estado estacionario:

Si en lugar del agua de hielo en un vaso de precipitados, se utiliza agua a temperatura ambiente en un recipiente suficientemente aislado térmicamente, la corriente calorífica  $P_Q$  se puede determinar calorimétricamente midiendo la cantidad de calor  $dQ$  entregada al agua en un tiempo  $dt$ :

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot dT\} = c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{\text{H}_2\text{O}}$ : Capacidad calorífica específica del agua

$m_{\text{H}_2\text{O}}$ : Masa del agua

$dT/dt$ : Aumento de la temperatura del agua en el tiempo  $dt$

El aumento de la temperatura del agua en un tiempo determinado se puede medir directamente. La conductividad calorífica  $\lambda$  teniendo en cuenta la pérdida de potencia, resulta directamente de la ecuación (7) con la pendiente  $k$  de la recta de (6).

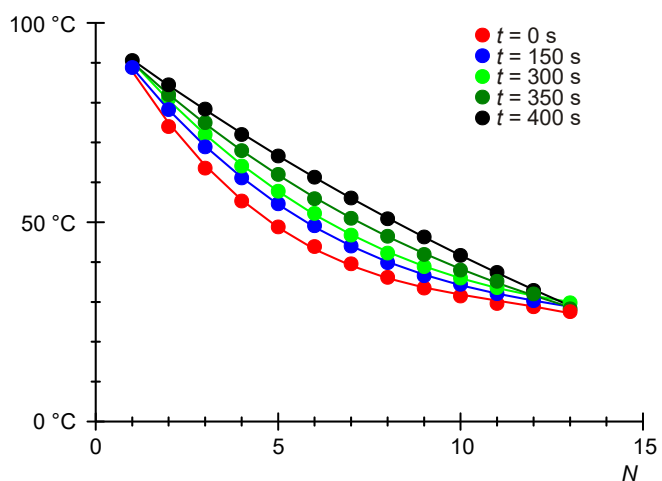


Fig. 2: Temperaturas a lo largo de la barra de aluminio con intervalos temporales de 150 s

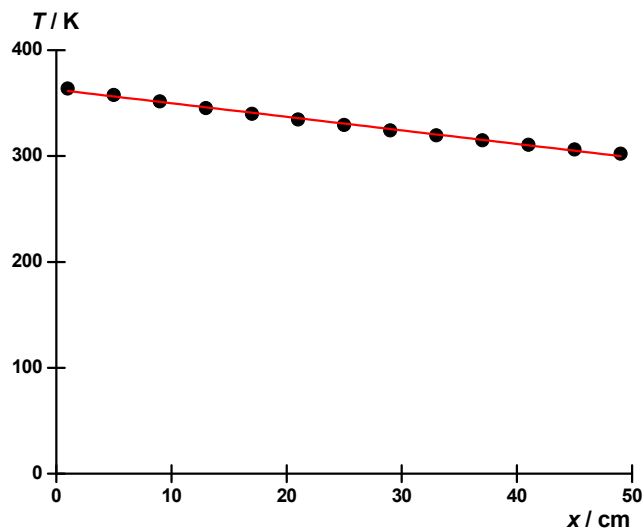


Fig. 3: Temperatura  $T$  en dependencia con la distancia  $x$  de los puntos de medición en estado estacionario

## Conduction thermique

### MESURER LA CONDUCTION THERMIQUE DANS DES BARRES METALLIQUES

- Mesurer la courbe de température le long de barres métalliques chauffées d'un côté et refroidies de l'autre, à l'état non stationnaire et stationnaire.
- Mesurer le courant thermique à l'état stationnaire.
- Déterminer la conductivité thermique du matériau de la barre.

UE2020100

02/25 UD



Fig. 1 : Disposition pour mesure

### NOTIONS DE BASE GENERALES

La chaleur peut être transmise d'une zone chaude à une zone froide par conduction thermique, rayonnement thermique et convection. En conduction thermique, ce transport d'énergie s'effectue par l'interaction entre les atomes ou molécules voisins, sans que ceux-ci ne soient eux-mêmes transportés. En cas de réchauffement par ex. d'une barre métallique, les atomes situés à l'extrémité chaude

oscillent plus fortement, c'est-à-dire avec plus d'énergie, qu'à l'extrémité froide. L'énergie est cédée aux atomes voisins par des chocs avec ceux-ci et transmise ainsi à travers la barre. Les métaux sont des conducteurs thermiques particulièrement bons, car ils profitent en plus des chocs entre des électrons libres et les atomes.

Dans une barre cylindrique de section de surface  $A$ , dont les extrémités sont maintenues à différentes températures, un gradient de température se stabilise après un certain temps le long de la barre, de sorte que la température  $T$  diminue régulièrement vers l'extrémité froide. Pendant un temps  $dt$ , une quantité d'énergie  $dQ$  traverse la section de la barre et il se forme un courant thermique constant  $P_Q$  :

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$  : courant thermique (mesuré en watts)

$A$  : surface de section de la barre

$\lambda$  : conductivité thermique du matériau de la barre

$T$  : température

$x$  : coordonnées le long de la barre

Avant que le gradient de température constant ne soit atteint, la barre, au moment  $t$ , présente une répartition thermique  $T(x,t)$ , qui s'approche progressivement de l'état stationnaire. L'équation différentielle est appliquée :

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$  : chaleur spécifique et  $\rho$  : densité

$\rho$  : densité du matériau de la barre

Dans le cas stationnaire, il y a concordance avec l'équation (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ et } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

Dans l'expérience, la barre est chauffée électriquement à une extrémité. Une source de chaleur à régulation électronique alimente la barre de conduction avec un courant thermique qui peut être déterminé comme puissance électrique

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

par la mesure de la tension de chauffage  $U$  et du courant de chauffage  $I$ . La régulation électronique du courant garantit que l'extrémité de la barre atteint très rapidement une température d'environ 90 °C, qui sera ensuite maintenue constante.

La chaleur à l'autre extrémité de la barre est évacuée via les lamelles de refroidissement dans de l'eau glacée ou tout simplement dans de l'eau à température ambiante. La puissance thermique cédée peut donc être déterminée par voie calorimétrique.

Une manchette isolante réduit le dégagement de chaleur de la barre de conduction à l'environnement et améliore la linéarité du profil de température à l'état stationnaire. Un thermomètre électronique ultrarapide mesure les températures aux points de mesure prévus le long de la barre. Vous disposez d'une barre en cuivre et d'une barre en aluminium.

## LISTE DES APPAREILS

1 Kit d'appareils sur la conduction thermique	1017329
1 Barre conductrice de chaleur en aluminium	1017331
1 Barre conductrice de chaleur en cuivre	1017330
1 Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A @230 V	1003312
ou	
1 Alimentation CC 0 – 20 V, 0 – 5 A @115 V	1003311
1 Thermomètre de poche numérique ultra-rapide	1023780
1 Sonde à immersion NiCr-Ni type K, -65 – 550°C	1002804
1 Câbles d'Expérimentation de Sécurité, 75cm, bleu, rouge (2 pcs)	1017718
1 Bécher forme basse 500 ml	1025691
Equipements complémentaires recommandés :	
2 Multimètres numériques P1035	1002781
L'eau glacée	

## MONTAGE ET REALISATION

### Note :

L'expérience est réalisée à l'exemple d'une barre conductrice de chaleur en aluminium.

- Nettoyer les surfaces de la barre conductrice de chaleur et appliquer une très fine couche de pâte thermoconductrice.
- Visser le module chauffant sur la barre conductrice de chaleur avec la vis de fixation ; ajuster la barre de manière à ce que les trous (points de mesure de la température) soient orientés vers le haut.
- Glisser la manchette isolante au-dessus de la barre conductrice de chaleur et ajuster les évidements de la mousse au-dessus des points de mesure de température.
- Visser sans serrer la paire de lamelles à l'extrémité de la barre avec la vis de fixation, l'aligner dans le récipient de refroidissement (bécher), puis serrer.
- Remplir le bécher d'eau glacée et, le cas échéant, renouveler celle-ci au cours de l'expérience.
- Brancher le bloc d'alimentation CC aux douilles de connexion pour obtenir une alimentation électrique. Observer impérativement la polarité : rouge = pôle positif. Ponter la deuxième paire de douilles au moyen de la fiche de court-circuit.
- Pour mesurer le courant de chauffage, à la place de la fiche de court-circuit, brancher un ampèremètre à la paire de douilles supérieure.
- Pour déterminer avec le plus de précision possible la puissance électrique absorbée (produit de la tension et du courant de chauffage), mesurer la tension directement sur le module chauffant via la paire de douilles inférieure et ne pas la lire sur le dispositif d'alimentation électrique.
- Mesurer la température avec un thermomètre électronique (palpeur ultrarapide avec thermocouple) dans des intervalles si possible identiques aux points de mesure 1 à 13 de la barre conductrice de chaleur (Tab. 1). Auparavant, appliquer une petite quantité de pâte thermoconductrice dans les points de mesure.
- Effectuer plusieurs séries de mesures, par ex. dans un intervalle de 150 s, jusqu'à obtenir l'état stationnaire (Tab. 1).

### EXEMPLE DE MESURE

Tension de chauffage  $U$  : 12 V  
 Courant de chauffage  $I$  : 1,6 A

Tab. 1 : Points de mesure  $N$ , écarts des points de mesure  $x$  et températures  $T$  aux points de mesure pour cinq séries de mesure réalisées dans un intervalle de 150 s

N	x / cm	T / °C				
		t = 0 s	t = 150 s	t = 300 s	t = 350 s	t = 400 s
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

### ÉVALUATION

- Représenter les séries de mesures du tableau 1 sous forme graphique dans un diagramme  $T(N)$  (Fig. 2).

Avec le temps, les points de mesure s'approchent d'une courbe linéaire qui signale que l'état stationnaire est atteint.

- Convertir en Kelvin les températures de la série de mesures pour  $t = 400$  s du Tab. 1 selon

$$(5) \quad K = ^\circ C + 273,15 = \frac{(^{\circ}F + 459,67)}{1,8}$$

les représenter sous forme graphique en fonction de l'écart  $x$  et adapter une droite aux points de mesure (Fig. 3).

Pour la pente de la droite  $k$ , il en résulte :

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{K}{cm}$$

La pente de la droite  $k$  correspond au gradient de température de l'équation (1) :

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Dans un premier temps, en supposant de manière simplifiée que le courant thermique  $P_Q$  correspond à la puissance électrique  $P_{el}$ , on détermine la conductivité thermique  $\lambda$ . À partir de (7), on obtient

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{K}{cm} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{W}{m \cdot K}$$

La valeur déterminée par la mesure diverge d'env. 30 % de la valeur empirique  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

En réalité, le courant thermique  $P_Q$  correspond à la puissance électrique  $P_{el}$ , déduction faite d'une faible perte de puissance  $P_l$  :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_l$$

Par conséquent :

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_l}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_l = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Pour les pertes en puissance, il en résulte avec la valeur empirique  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  :

$$(11) \quad P_l = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{K}{cm} \cdot 236 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

### Note pour mesurer le courant thermique à l'état stationnaire :

Si l'on remplace l'eau glacée dans le bécber par de l'eau à température ambiante dans un récipient suffisamment isolé, on peut déterminer par la calorimétrie le courant thermique  $P_Q$  au moyen de la quantité de chaleur  $dQ$  cédée à l'eau pendant le temps  $dt$  :

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{ c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot dT \} = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{H_2O}$  : capacité thermique spécifique de l'eau

$m_{H_2O}$  : masse de l'eau

$dT/dt$  : augmentation de la température de l'eau pendant le temps  $dt$

L'augmentation de la température de l'eau dans une période déterminée peut être mesurée directement. Dans ce cas, compte tenu des pertes en puissance, la conductivité thermique  $\lambda$  résulte alors directement de l'équation (7) avec la pente de droite  $k$  (6).

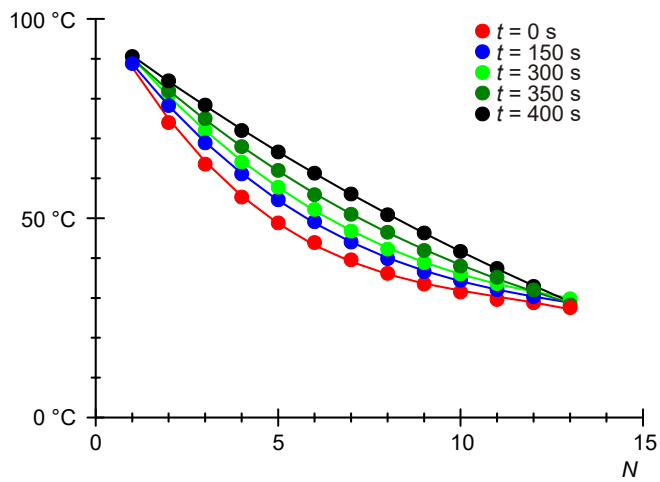


Fig. 2 : Températures le long de la barre en aluminium dans cinq séries de mesures effectuées dans un écart de 150 s

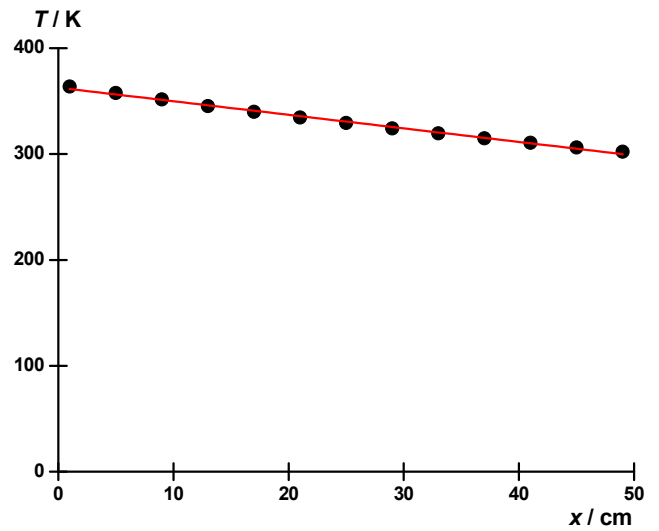


Fig. 3 : Température  $T$  en fonction de l'écart  $x$  des points de mesure à l'état stationnaire



## Conducibilità termica

### MISURAZIONE DELLA CONDUCIBILITÀ IN ASTE METALLICHE

- Misurazione dell'andamento della temperatura lungo un'asta metallica, un'estremità della quale viene riscaldata e l'altra raffreddata, in stato stazionario e non stazionario.
- Misurazione del flusso di calore nello stato stazionario.
- Determinazione della conducibilità termica del materiale dell'asta.

UE2020100

02/25 UD

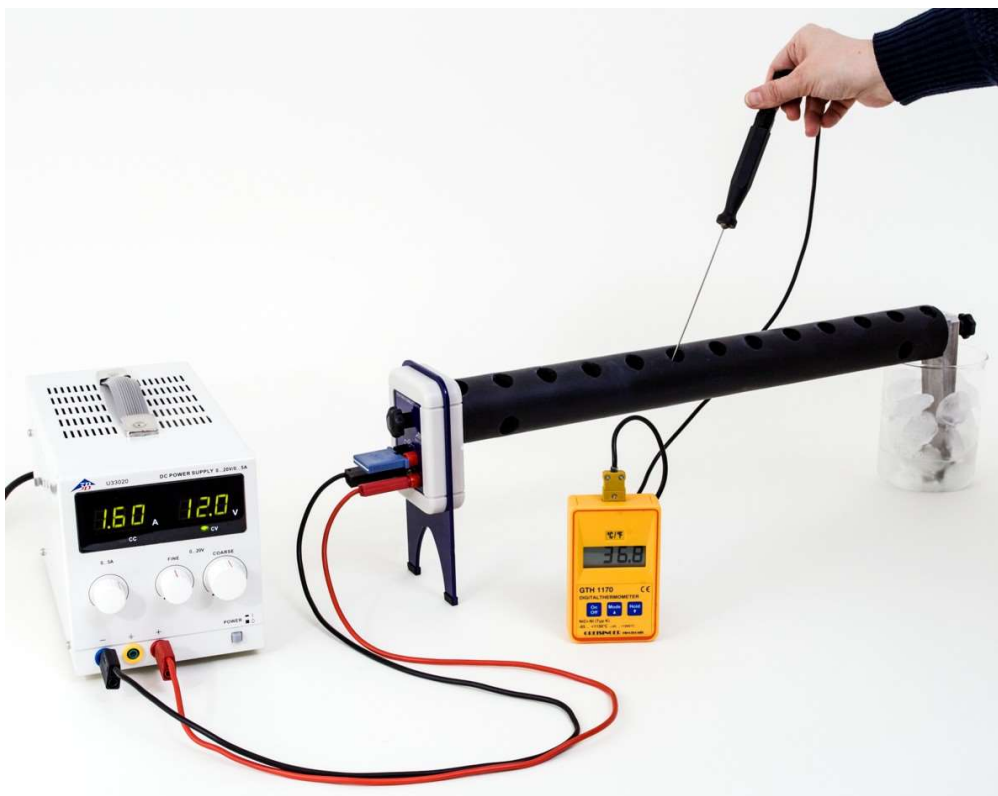


Fig. 1: Disposizione per la misurazione

### BASI GENERALI

Il calore può essere trasferito da una zona più calda a una più fredda mediante conduzione, irraggiamento e convezione. Nella conduzione termica tale trasferimento di energia avviene da una zona più calda a una più fredda per effetto dell'interazione reciproca di molecole o atomi contigui, senza che vi sia spostamento di materia. Se, ad esempio, si riscalda un'asta metallica gli atomi nell'estremità

più calda oscillano più intensamente, ovvero con un'energia più elevata che nell'estremità fredda. L'energia viene trasferita agli atomi contigui per effetto degli urti, innescando l'effetto di conduzione lungo l'asta. In particolare, i metalli sono buoni conduttori termici, perché a questo effetto si aggiungono le collisioni tra elettroni liberi e atomi.

In un'asta con sezione trasversale  $A$ , le cui estremità sono mantenute a temperature differenti, si genera dopo un determinato periodo di tempo un gradiente di temperatura lungo l'asta, per cui la temperatura partendo dall'estremità più calda diminuisce uniformemente avvicinandosi a quella dell'estremità più fredda, generando un flusso di calore costante. Contemporaneamente nel tempo  $dt$  una quantità di calore  $dQ$  scorre nella sezione trasversale dell'asta, generando un flusso di calore costante  $P_Q$ :

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Flusso di calore (misurato in Watt)

$A$ : Sezione trasversale dell'asta

$\lambda$ : Conducibilità termica del materiale dell'asta

$T$ : Temperatura

$x$ : Coordinata spaziale lungo l'asta

Prima di raggiungere il gradiente di temperatura costante, nell'asta si produce una distribuzione della temperatura nel tempo  $T(x,t)$ , che si avvicina gradualmente allo stato stazionario. Vale la seguente equazione differenziale

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : Calore specifico

$\rho$ : Densità del materiale dell'asta

Nello stato stazionario vale conformemente all'equazione (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ e } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

Nell'esperimento un'estremità dell'asta viene riscaldata elettricamente. Una sorgente di calore alimentata elettronicamente fornisce all'asta conduttiva termica un flusso di calore, che può essere calcolato in base alla potenza elettrica

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

mediante la misurazione della tensione di riscaldamento  $U$  e della corrente di riscaldamento  $I$ . La regolazione elettronica della corrente fa in modo che l'estremità dell'asta raggiunga in un tempo estremamente rapido la temperatura di 90 °C, che viene poi mantenuta costante.

Attraverso apposite lamelle di raffreddamento il calore viene ceduto all'altra estremità dell'asta, raffreddata con acqua ghiacciata o con semplice acqua a temperatura ambiente. La potenza termica ceduta può essere determinata utilizzando un calorimetro.

Un manicotto isolante riduce la perdita di calore dell'asta conduttiva termica nell'ambiente e migliora la linearità del profilo di temperatura nello stato stazionario. Utilizzando un termometro elettronico istantaneo vengono misurate le temperature in determinati punti di misurazione lungo l'asta. Vengono utilizzate un'asta di alluminio e una di rame.

## ELENCO DEGLI STRUMENTI

1	Kit conducibilità termica	1017329
1	Asta conduttiva termica alluminio	1017331
1	Asta conduttiva termica rame	1017330
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 5 A @230 V	1003312
0		
1	Alimentatore CC 0 – 20 V, 5 A @115 V	1003311
1	Termometro tascabile digitale rapido	1023780
1	Sensore a immersione NiCr-Ni Tipo K, -65°C – 550°C	1002804
1	Cavi di Sicurezza per Esperimenti, 75 cm, blu, rosso, (2 pz.)	1017718
1	Becher forma bassa 500 ml	1025691
In aggiunta si consiglia:		
2	Multimetri digitali P1035	1002781
	Acqua ghiacciata	

## MONTAGGIO E ESECUZIONE

### Nota:

L'esperimento viene eseguito a titolo esemplificativo con l'asta conduttiva termica in alluminio.

- Pulite l'asta conduttiva termica presso le superfici di taglio e distribuire un sottilissimo strato di pasta conduttiva termica.
- Avvitare il modulo termico all'asta conduttiva termica per mezzo della vite di fissaggio; disporre l'asta in modo tale che i fori (punti di misurazione della temperatura) siano rivolti verso l'alto.
- Applicare il manicotto isolante sull'asta conduttiva termica e posizionare gli intagli dell'espanso sui punti di misurazione.
- Utilizzando la vite di fissaggio avvitare, senza stringere, la coppia di lamelle all'estremità dell'asta, posizionarla nel recipiente di raffreddamento (becher) e serrare.
- Riempire il becher con acqua ghiacciata, cambiandola se necessario nel corso dell'esperimento.
- Per l'alimentazione di corrente, collegare l'alimentatore DC tramite i jack di raccordo. Prestare assoluta attenzione alla polarità: rosso = polo positivo. Cortocircuitare la seconda coppia di jack per mezzo della spina di corto circuito.
- Per la misurazione della corrente di riscaldamento, anziché la spina di cortocircuito collegare alla coppia di jack superiore un amperometro.
- Per una determinazione il più possibile precisa della potenza elettrica assorbita (prodotto della tensione e della corrente di riscaldamento), misurare direttamente presso il modulo termico tramite la coppia di jack inferiore la tensione di riscaldamento, senza leggerla dall'alimentatore.
- Misurare la temperatura con un termometro elettronico (sensore ultrarapido con termocoppia) ad intervalli temporali in più possibile identici presso i punti di misurazione da 1 a 13 sull'asta conduttiva termica (Tab. 1). A tale scopo, applicare prima una piccola quantità di pasta conduttiva termica sui punti di misurazione.
- Eseguire diverse serie di misurazione ad es. ad intervalli di 150 s, fino a raggiungere lo stato stazionario (Tab. 1).

**ESEMPIO DI MISURAZIONE**

Tensione di riscaldamento  $U$ : 12 V  
 Corrente di riscaldamento  $I$ : 1,6 A

Tab. 1: Punti di misurazione  $N$ , distanze dei punti di misurazione  $x$  e temperature  $T$  presso i punti di misurazione per cinque diverse serie di misurazione con un intervallo temporale pari a 150 s

N	x / cm	T / °C				
		t = 0 s	t = 150 s	t = 300 s	t = 350 s	t = 400 s
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

**ANALISI**

- Rappresentare graficamente le serie di misurazioni dalla Tab. 1 in un diagramma  $T(N)$  (Fig. 2).

I punti di misurazione si approssimano con il tempo a un andamento lineare, che rispecchia il raggiungimento dello stato stazionario.

- Calcolare le temperature della serie di misurazioni per  $t = 400$  s dalla Tab. 1 come da

$$(5) \quad K = ^\circ C + 273,15 = \frac{(^{\circ}F + 459,67)}{1,8}$$

in Kelvin, rappresentare graficamente in funzione della distanza  $x$  e tracciare una retta sui punti di misurazione (Fig. 3).

Per l'incremento lineare  $k$  si ha:

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{K}{cm}$$

L'incremento lineare  $k$  corrisponde al gradiente di temperatura nell'equazione (1):

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Successivamente, nella supposizione semplificata che il flusso di calore  $P_Q$  corrisponde alla potenza elettrica  $P_{el}$ , si determina la conduttività termica  $\lambda$ . Da (7) consegue che:

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{K}{cm} \cdot 490 \cdot \text{mm}^2} = 306 \frac{W}{m \cdot K}$$

Il valore determinato in fase di misurazione si discosta solamente del 30% circa dal valore di letteratura  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

In effetti, il flusso di calore  $P_Q$  corrisponde alla potenza elettrica  $P_{el}$  meno la perdita di potenza  $P_l$ :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_l$$

Pertanto si ha:

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_l}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_l = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Per la perdita di potenza ne consegue con il valore di letteratura  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ :

$$(11) \quad P_l = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{K}{cm} \cdot 236 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

**Nota per la misurazione del flusso di calore nello stato stazionario:**

Se, invece dell'acqua ghiacciata nel becher, si utilizza acqua a temperatura ambiente in un recipiente sufficientemente isolato termicamente, il flusso di calore  $P_Q$  può essere determinato in base alla quantità di calore  $dQ$  ceduta all'acqua in un tempo  $dt$  utilizzando un calorimetro:

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot dT\} = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{H_2O}$ : capacità termica specifica dell'acqua

$m_{H_2O}$ : massa dell'acqua

$dT/dt$ : aumento della temperatura dell'acqua nel periodo  $dt$

L'aumento della temperatura dell'acqua entro un determinato periodo di tempo può essere misurato direttamente. La conduttività termica  $\lambda$  in considerazione della perdita di potenza deriva quindi direttamente dall'equazione (7) con l'incremento lineare  $k$  di cui in (6).

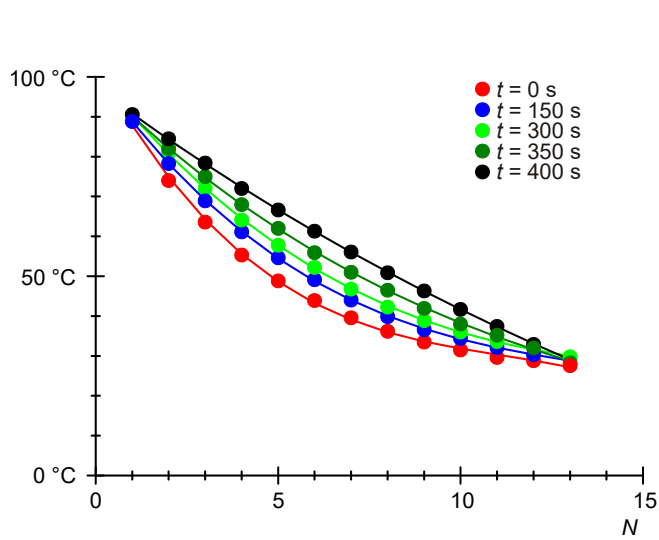


Fig. 2: Temperature lungo l'asta di alluminio in cinque serie di misur a una distanza temporale di 150 s

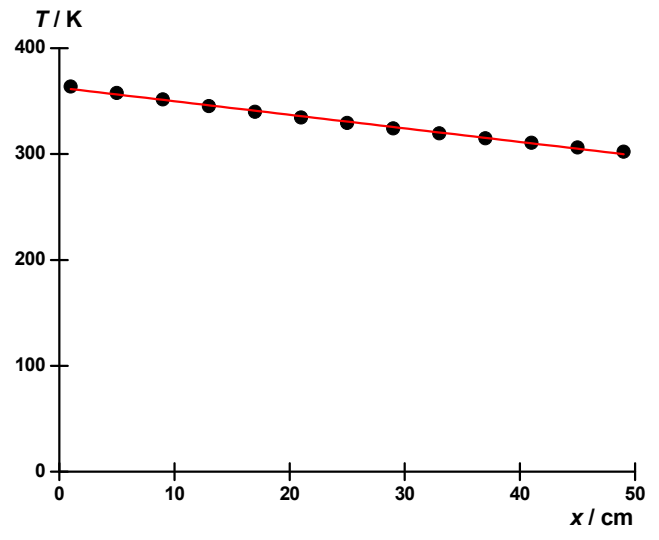


Fig. 3: Temperatura  $T$  in funzione della distanza  $x$  dei punti di misurazione nello stato stazionario

## Condução de calor

### MEDIÇÃO DA CONDUÇÃO DE CALOR EM HASTES DE METAL

- Medição do decurso da temperatura ao longo de hastes metálicas aquecidas unilateralmente e esfriadas unilateralmente em estado não estacionário e estacionário.
- Medição do fluxo de calor no estado estacionário..
- Determinação da condutibilidade térmica do material da haste.

UE2020100

02/25 UD



Fig. 1: Disposição de medição

### FUNDAMENTOS GERAIS

O calor pode ser transmitido por condução térmica, irradiação térmica e convecção de uma área mais quente para uma mais fria. Na condução térmica, este transporte de energia ocorre pela interação entre átomos ou moléculas avizinados, sem que estes sejam, eles mesmos, transportados. No aquecimento, por exemplo, de uma haste metálica, os átomos oscilam mais fortemente

na extremidade quente, ou seja, com uma energia maior que na extremidade fria. A energia é passada aos átomos avizinados por choques e, assim, conduzida pela haste. Os metais são condutores de calor especialmente bons, pois ainda são adicionados choques entre elétrons e átomos livres.

Em uma haste com área de perfil  $A$ , cujas extremidades são mantidas em temperaturas diferentes, instala-se, depois de algum tempo, um gradiente de temperatura ao longo da haste, de forma que a temperatura  $T$  diminui por igual na direção da extremidade mais fria. Nisto, em um tempo  $dt$ , uma quantidade de calor  $dQ$  flui pelo perfil da haste, e um fluxo constante de calor  $P_Q$  se constitui:

$$(1) P_Q = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

$P_Q$ : Fluxo de calor (medido em Watt)

$A$ : Área do perfil da haste

$\lambda$ : Condutibilidade térmica do material da haste

$T$ : Temperatura

$x$ : Coordenada local ao longo da haste

Antes que o gradiente constante de temperatura seja alcançado, a haste tem, no tempo  $t$ , uma distribuição de temperatura  $T(x,t)$ , que se aproxima gradativamente do estado estacionário. Vale a equação diferencial

$$(2) \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}(x,t) - c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0,$$

$c$ : Calor específico

$\rho$ : Densidade do material da haste

No caso estacionário, vale, em conformidade com a equação (1)

$$(3) \frac{\partial T}{\partial t}(x,t) = 0 \text{ e } \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x}(x,t) = \text{const.} = \frac{P_Q}{A}.$$

Na experiência, a haste é aquecida eletricamente em uma extremidade. Uma fonte de calor regulada eletronicamente alimenta a haste condutora térmica com um fluxo de calor, que pode ser determinado como potência elétrica

$$(4) P_{el} = U \cdot I$$

através da medição da tensão de aquecimento  $U$  e da corrente de aquecimento  $I$ . A regulação eletrônica da corrente faz com que a extremidade da haste alcance muito rapidamente uma temperatura de cerca de 90°C, que, então, é mantida constante.

Através das lamelas de esfriamento, o calor é dissipado, na outra extremidade da haste, para água gelada ou simplesmente água em temperatura ambiente. A potência térmica dissipada pode, assim, ser determinada calorimetricamente.

Uma bucha de isolamento reduz a perda de calor da haste condutora térmica para o ambiente e melhora a linearidade do perfil de temperatura no estado estacionário. Com um termômetro eletrônico com velocidade de segundos, as temperaturas são medidas nos locais de medição previstos ao longo da haste. Uma haste de cobre e uma haste de alumínio estão à disposição.

1 Cabos de experimento de segurança, 75 cm, vermelho, azul (2 unid.)	1017718
1 Copo forma baixa 500 ml	1025691
Recomendação suplementar:	
2 Multímetros digitais P1035	1002781
Água gelada	

## MONTAGEM E EXECUÇÃO

### Orientação:

A experiência é realizada, a título de exemplo, com a haste de condução de calor de alumínio.

- Limpar a haste de condução de calor nas áreas de contato e aplicar fina camada de pasta condutora térmica.
- Fixar o módulo de aquecimento, por meio do parafuso de fixação, na haste de condução de calor, posicionar a haste de forma que as perfurações (pontos de medição de temperatura) apontem para cima.
- Colocar a bucha de isolamento sobre a haste de condução de calor e posicionar as fendas da espuma sobre os pontos de medição de temperatura.
- Colocar o par de lamelas na extremidade da haste de forma solta com o parafuso de fixação, posicionar no recipiente de resfriamento (bêquer) e então apertar.
- Encher o copo com água gelada e, se necessário, trocar a água no decorrer da experiência.
- Para o fornecimento de energia elétrica, conectar a fonte de alimentação DC através dos conectores. Atentar sempre para a polaridade: vermelho = polo positivo. Contornar o segundo par de conectores por meio do plugue de curto circuito.
- Para a medição da corrente de aquecimento, conectar, ao invés do plugue de curto circuito, um aparelho de medição de corrente no par superior de conectores.
- Para a determinação mais precisa possível da potência elétrica absorvida (produto de tensão e corrente de aquecimento), medir a tensão de aquecimento diretamente no módulo de aquecimento através do par inferior de conectores e não na fonte de alimentação.
- Medir a temperatura com um termômetro eletrônico (sensor com velocidade de segundos com elemento térmico) em intervalos de tempo iguais nos pontos de medição 1 até 13 na haste de condução de calor (Tab. 1). Para tanto, aplicar uma pequena quantidade de pasta condutora térmica nos pontos de medição.
- Realizar várias séries de medição, por exemplo, com um intervalo de tempo de 150 s até atingir o estado estacionário (Tab. 1).

## LISTA DE APARELHOS

1 Conjunto de aparelhos condução de calor	1017329
1 Haste de condução de calor de alumínio	1017331
1 Haste de condução de calor de cobre	1017330
1 Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A @230 V	1003312
ou	
1 Fonte de alimentação DC 0 – 20 V, 0 – 5 A @115 V	1003311
1 Termômetro de bolso digital de segundos	1023780
1 Sensor de imersão NiCr-Ni tipo K, -65 – 550°C	1002804

### EXEMPLO DE MEDIÇÃO

Tensão de aquecimento  $U$ : 12 V  
 Corrente de aquecimento  $I$ : 1,6 A

Tab. 1: Pontos de medição  $N$ , distância entre pontos de medição  $x$  e temperaturas  $T$  nos pontos de medição para cinco séries diferentes de medição com intervalo de tempo de 150 s.

N	x / cm	T / °C				
		t = 0 s	t = 150 s	t = 300 s	t = 350 s	t = 400 s
1	1	88,7	88,8	90,0	90,0	90,6
2	5	74,0	78,3	81,0	82,0	84,5
3	9	63,6	68,9	72,0	75,0	78,4
4	13	55,3	61,1	64,1	68,0	72,0
5	17	48,8	54,6	57,8	62,0	66,6
6	21	43,9	49,1	52,2	55,9	61,3
7	25	39,6	44,0	46,8	51,0	56,1
8	29	36,2	39,9	42,3	46,5	50,9
9	33	33,5	36,6	38,9	41,9	46,3
10	37	31,5	34,4	36,0	38,0	41,7
11	41	29,6	32,1	33,6	35,2	37,4
12	45	28,8	30,3	31,8	32,0	32,9
13	49	27,6	28,8	29,8	28,3	29,1

### AVALIAÇÃO

- Representar graficamente os valores de medição da Tab. 1 em um diagrama  $T(N)$  (Fig. 2).

Os pontos de medição, com o tempo, aproximam-se de um decurso linear, que reflete a chegada ao estado estacionário.

- Converter as temperaturas da série de medição para  $t = 400$  s da Tab.1 conforme

$$(5) \quad K = ^\circ C + 273,15 = \frac{(^{\circ}F + 459,67)}{1,8}$$

para Kelvin, representar graficamente em dependência da distância  $x$  e adaptar uma reta aos pontos de medição (Fig. 3).

Para a inclinação  $k$  da reta, resulta:

$$(6) \quad k = -1,28 \frac{K}{cm}$$

A inclinação  $k$  da reta corresponde ao gradiente da temperatura na equação (1):

$$(7) \quad k = \frac{dT}{dx} = -\frac{P_Q}{\lambda \cdot A}$$

Inicialmente, sob a suposição simplificada de que o fluxo térmico  $P_Q$  corresponde à potência elétrica  $P_{el}$ , a condutibilidade térmica  $\lambda$  é determinada. De (7), resulta:

$$(8) \quad \lambda = -\frac{P_Q}{k \cdot A} \approx -\frac{P_{el}}{k \cdot A} = -\frac{12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A}}{-1,28 \frac{K}{cm} \cdot 490 \cdot mm^2} = 306 \frac{W}{m \cdot K}$$

O valor determinado pela medição difere em cerca de 30% do valor de literatura  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ .

De fato, a corrente térmica  $P_Q$  corresponde à potência elétrica  $P_{el}$  menos uma potência de perda  $P_I$ :

$$(9) \quad P_Q = P_{el} - P_I$$

Então:

$$(10) \quad \lambda = -\frac{P_{el} - P_I}{k \cdot A} \Leftrightarrow P_I = P_{el} + k \cdot \lambda \cdot A$$

Para a potência de perda, resulta, com o valor de literatura  $\lambda = 236 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ :

$$(11) \quad P_I = 12 \text{ V} \cdot 1,6 \text{ A} - 1,28 \frac{K}{cm} \cdot 236 \frac{W}{m \cdot K} \cdot 490 \text{ mm}^2 = 4,4 \text{ W}$$

### Orientação para a medição da corrente térmica no estado estacionário:

Se, ao invés de água gelada, for usada água em temperatura ambiente no copo em recipiente suficientemente isolado termicamente, a corrente térmica  $P_Q$  pode ser determinada calorimetricamente pela quantidade de calor  $dQ$  transmitida para a água em um intervalo de tempo  $dt$ :

$$(12) \quad P_Q = \frac{dQ}{dt} = \frac{d}{dt} \{c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot dT\} = c_{H_2O} \cdot m_{H_2O} \cdot \frac{dT}{dt}$$

$c_{H_2O}$ : capacidade térmica específica da água

$m_{H_2O}$ : massa da água

$dT/dt$ : aumento da temperatura da água no tempo  $dt$

O aumento da temperatura da água por tempo determinado pode ser medido diretamente. A condutibilidade térmica  $\lambda$ , considerada a potência de perda, resulta diretamente da equação (7) com a inclinação  $k$  da reta de (6).

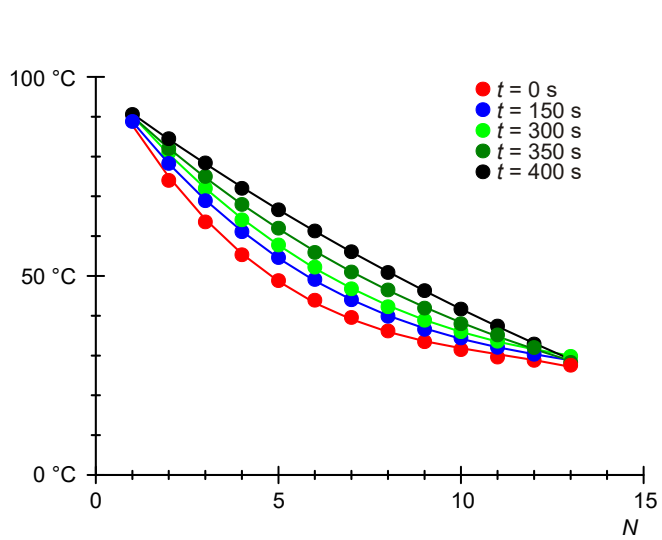


Fig. 2: Temperaturas ao longo da haste de alumínio em cinco seqüências de medição com intervalo de tempo de 150 s

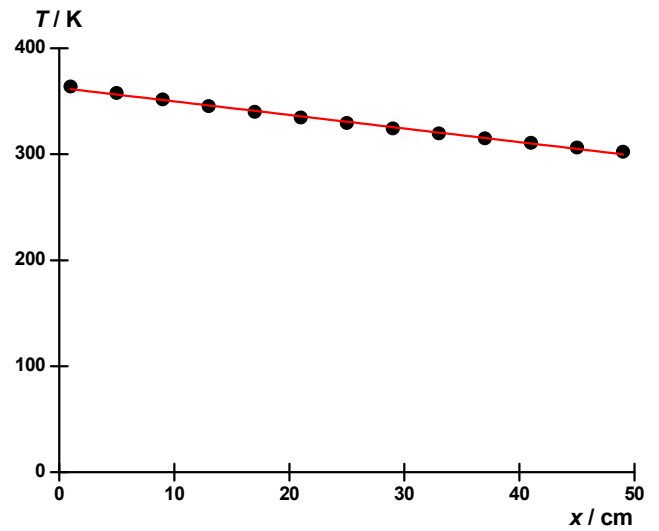


Fig. 3: Temperatura  $T$  em dependência da distância  $x$  dos pontos de medição no estado estacionário