



W 06 „Abkühlungskurven und Wärmeübergang“

Aufgaben

1 Messen Sie die Abkühlungskurven für mindestens drei verschiedene Metallkörper. Es sind zwei Würfel aus Messing oder Aluminium mit verschiedenen Kantenlängen sowie ein Zylinder oder eine Kugel mit vergleichbarer Masse auszuwählen. Zusätzlich kann die Abkühlungskurve eines Testkörpers des anderen Materials aufgenommen werden.

2 Ermitteln Sie unter Verwendung des Newtonschen Abkühlungsgesetzes die Abkühlungsfaktoren.

3 Diskutieren Sie die Unterschiede zwischen den Abkühlungsfaktoren. Bestimmen Sie die Wärmeübergangskoeffizienten und die Wärmeübergangswiderstände für die verschiedenen Körper. Schätzen Sie den Einfluss der Wärmestrahlung auf die Abkühlung ab.

Zusatzaufgabe: Die Abkühlungskurven von zwei Metallwürfeln mit unterschiedlicher Oberfläche (blank poliert, dunkel) sind im Vakuum aufzunehmen und deren Emissionsgrade sind zu bestimmen.

Literatur

Physikalisches Praktikum, 13. Auflage, Hrsg. W. Schenk, F. Kremer, Wärmelehre, 1.0.3, 1.3
Gerthsen Physik, 22. Auflage, D. Meschede, 5.4

Zubehör

Digitale Thermometer, Metallkörper, Lüfter, elektrische Heizplatte mit Stelltrafo, Stoppuhr.
Für Zusatzaufgabe: Vakuumpumpe, Rezipient mit Schutzhülle, digitales Manometer, digitale Thermometer

Schwerpunkte zur Vorbereitung

- Wärmeübertragungsprozesse, Wärmeleitung, Wärmestrahlung, Konvektion
- Wärmeübergang, Wärmestrom, Wärmeübergangskoeffizient, Wärmeübergangswiderstand, k -Wert
- Abkühlungskurve, Newtonsches Abkühlungsgesetz, Stefan-Boltzmann-Gesetz
- Elektrische Temperaturmessverfahren, Widerstandsthermometer, Thermoelement (Seebeck-Effekt)

Bemerkungen

Die Temperaturen T im Inneren des Probekörpers und die des regelbaren Luftstromes T_U werden mit digitalen Thermometern oder mit Thermoelementen, deren Seebeck-Koeffizient bekannt ist, gemessen. Die Abkühlung erfolgt durch erzwungene Konvektion mit Hilfe eines regelbaren Lüfters. Die Auswertung kann graphisch auf einfach-logarithmischem Papier ($\lg(T-T_U)$ - t -Diagramm) durchgeführt werden. Die Anfangstemperatur T_0 soll jeweils etwa 90 °C betragen und die Abkühlung bis auf etwa 40 °C erfolgen. Den ausschließlich durch Konvektion bedingten Wärmestrom $\Phi_{\text{th, K}}$ kann man mit der Gleichung

$$\Phi_{\text{th, K}} = -\frac{dQ}{dt} = \alpha A (\vartheta - \vartheta_U) = \alpha A (T - T_U) = \alpha A \Delta T \quad (1)$$

berechnen. Dabei sind α der Wärmeübergangskoeffizient, ϑ die Temperatur und A die Oberfläche des sich abkühlenden Körpers, über die der Wärmestrom an die Umgebung abfließen kann. Aus Gl. (1) folgt für die Abkühlung

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\alpha A}{mc}(T - T_U). \quad (2)$$

Mit dem Ansatz
$$\frac{dT}{dt} = -a(T - T_U) \quad (3)$$

ergibt sich nach Integration
$$T - T_U = (T_0 - T_U) \exp(-at) \quad (4)$$

Dabei sind a der Abkühlungsfaktor und T_0 die Anfangstemperatur zu Beginn der Zeitmessung. Man erkennt, dass die Abkühlung in Abhängigkeit von der Zeit exponentiell verläuft. Je mehr sich die Körpertemperatur der Umgebungstemperatur nähert, desto langsamer kühlt sich der Körper ab. Über den Anstieg B mit

$$B = \frac{\ln \Delta T_1 - \ln \Delta T_2}{t_1 - t_2},$$

wobei $(\ln \Delta T_1, t_1)$ und $(\ln \Delta T_2, t_2)$ Punkte auf einer Ausgleichsgeraden sind, lässt sich der Abkühlungsfaktor a bestimmen. Der Wärmeübergangskoeffizient berechnet sich dann nach der Gleichung

$$\alpha = \frac{a m c}{A}. \quad (5)$$

Die Gleichung zur Berechnung des Wärmeübergangswiderstands $R_W = 1/(\alpha \cdot A)$ kann aus der Analogiebetrachtung von Wärmestrom und elektrischem Strom (Ohmsches Gesetz) hergeleitet werden.

Die obigen Betrachtungen vernachlässigen die Abkühlung durch Wärmestrahlung, die man bei Aufgabe 3 unter Anwendung des Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetzes abschätzen soll:

$$\Phi_{th,S} = \varepsilon \sigma A (T^4 - T_U^4). \quad (6)$$

Dabei sind $\Phi_{th,S}$ der Wärmestrom durch Wärmestrahlung, ε der Gesamtemissionsgrad der Körperoberfläche und σ die Stefan-Boltzmann Konstante mit $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$. In unserem Experiment kann $\varepsilon = 0.2$ angenommen werden. Zur quantitativen Abschätzung berechnet man das Verhältnis von $\Phi_{th,S}$ und $\Phi_{th,K}$ mit den Gln. (1) und (6):

$$\frac{\Phi_{th,S}}{\Phi_{th,K}} = \frac{\varepsilon \sigma (T_0^4 - T_U^4)}{\alpha (T_0 - T_U)}. \quad (7)$$

Erfolgt die Abkühlung von Probekörpern durch Konvektion sowie durch nicht vernachlässigbare Wärmestrahlung, die man mit dem Stefan-Boltzmannschen Strahlungsgesetz berücksichtigen kann, lautet der Ansatz für den Wärmestrom ($\Phi_{th} = dQ/dT$): $\Phi_{th} = \Phi_{th,K} + \Phi_{th,S}$

$$\begin{aligned} \Phi_{th,K} &= \alpha_K A (T - T_U) \\ \Phi_{th,S} &= \varepsilon \sigma A (T^4 - T_U^4) \\ \Phi_{th} &= cm \frac{dT}{dt} = \alpha_K A (T - T_U) + \varepsilon \sigma A (T^4 - T_U^4). \end{aligned} \quad (8)$$

Für die Bestimmung des unbekanntes Wertes von ε untersucht man die Abkühlung im Vakuum, die ausschließlich durch Wärmestrahlung erfolgt. Wenn man in Gl.(1) α Null setzt, die Integration in den Grenzen (t_1, T_1) und (t_2, T_2) ausführt und nach ε umstellt, ergibt sich die Bestimmungsgleichung

$$\varepsilon = \frac{c m}{2\sigma A \Delta t T_U^3} \left[\frac{1}{2} \left(\ln \frac{T_2 - T_U}{T_2 + T_U} - \ln \frac{T_1 - T_U}{T_1 + T_U} \right) - \left(\arctan \frac{T_2}{T_U} - \arctan \frac{T_1}{T_U} \right) \right], \quad (9)$$

wobei $\Delta t = t_2 - t_1$ sich auf dasjenige Zeitintervall bezieht, in dem sich die Abkühlung von der Temperatur T_2 auf die Temperatur T_1 vollzogen hat.

Hinweise zur Durchführung der Zusatzaufgabe - Abkühlung im Vakuum

(Dauer dieser Messung mit Auswertung mindestens 45 Minuten)

Es wird zunächst einer der Probekörper (Metallwürfel), in dessen Inneren der kalibrierte Fühler eines Digitalthermometers befestigt wird, mit einer Heizplatte auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt. Danach schließt man die Vakuumglocke aus Glas und nimmt die Vakuumpumpe in Betrieb. Nach einigen Minuten hat sich ein konstantes Vakuum (Kontrolle mit Manometer) eingestellt und die Messung der Abkühlungszeiten in vorgegebenen Temperaturbereichen kann nach einer in einem Vorversuch zu ermittelnden Wartezeit (wegen der adiabatischen Abkühlung als Folge der Evakuierung) beginnen. Gleichzeitig ist die Umgebungstemperatur (Die Temperatur der Glasglocke wird mit einem Oberflächentemperaturmessfühler bestimmt.) zu messen. Mit den bekannten Daten des Würfels (m , c , A) und den gemessenen Temperaturen kann der gesuchte Emissionsgrad berechnet werden.

Zusätzlich können zur Bestimmung von α nach Belüftung des Rezipienten und der Entfernung der Vakuumglocke die Metallwürfel wieder erwärmt und anschließend durch die Konvektionsströmung eines Lüfters abgekühlt werden, wobei die Temperatur des Luftstromes (T_U) mit einem Digitalthermometer bestimmt wird. Die in geeigneten Zeitabständen gemessenen Innentemperaturen (T) des Würfels sind graphisch darzustellen. Zur Bestimmung der Abkühlungsgeschwindigkeit dT/dt ist eine Tangente an die Kurve $T(t)$ für bestimmte Temperaturen zu legen. Damit kann der Wärmeübergangskoeffizient α berechnet werden.

Die Messungen zur Zusatzaufgabe können gleichzeitig für zwei verschiedene Metallwürfel aus gleichem Material und gleichgroßer Oberfläche aber mit veränderter Oberflächenbeschaffenheit durchgeführt werden.