

Ein Modellhaus mit auswechselbaren Seitenwänden soll zur Bestimmung von Wärmedurchgangszahlen (k -Werten) verschiedener Wände und Fenster sowie zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit verschiedener Materialien dienen.

1. Theoretische Grundlagen

Temperaturunterschiede versuchen sich stets auszugleichen. Deshalb breitet sich Wärme immer von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur aus. Die Ausbreitung kann auf drei verschiedene Arten erfolgen:

- Durch **Wärmeströmung** oder Wärmekonvektion, bei der eine Stoffmenge mit ihrem Wärmeinhalt beginnend von einer Stelle zu einer anderen Stelle strömt.
- Durch **Wärmeleitung**, bei der die Wärme von Teilchen zu Teilchen übertragen wird, ohne dass diese dabei ihren Ort wesentlich verändert. Diese Teilchen können je nach dem Stoff Atome, Moleküle oder Elektronen sein.
- Durch **Wärmestrahlung** ähnlich der Lichtstrahlung, ohne dass irgendein Stoff die Vermittlung übernehmen muss.

1.1 Wärmeleitfähigkeit

Wenn auf beiden Seiten einer Trennwand (**Bild 1**) verschiedene Temperaturen herrschen, findet man experimentell, dass die von der einen zur anderen Seite geleitete Wärmemenge Q proportional zum Flächeninhalt des Wandstückes A , zur Zeit t des Wärmeleitvorganges und zur Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2$ auf beiden Seiten und umgekehrt proportional zur Wandstärke d ist.

Bezeichnet man die Proportionalitätskonstante als Wärmeleitfähigkeit λ , so ergibt sich für Q die Gleichung:

$$Q = \frac{\lambda}{d} \cdot A \cdot t \cdot \Delta\vartheta \quad [\lambda] = \text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (1)$$

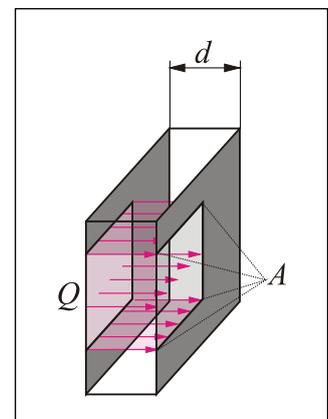


Bild 1: Wärmeleitung

1.2 Wärmedämmung

Schlechte Wärmeleiter dienen in der Technik und im Bauwesen zur Isolierung gegen Wärmeverluste oder, wie man auch sagt, zur Wärmedämmung. Insbesondere sind Gase, wie z.B. Luft schlechte Wärmeleiter. Sobald jedoch größere Räume mit Luft erfüllt sind, entsteht eine Wärmeströmung, so dass man nicht mehr mit der reinen Wärmeleitfähigkeit λ , sondern mit einer erhöhten Äquivalentleitfähigkeit λ' rechnen muss. Die Schutzwirkung der meisten Dämmstoffe beruht weitgehend auf der Unterbindung der Strömung durch Einschluss der Luft in Poren. Deshalb nimmt auch die Wärmeisolation ab, wenn eindringende Feuchtigkeit die Luft verdrängt oder wenn die Packungsdichte die Zahl und Größe der Poren vermindert. Dass die Wärmedämmstoffe zugleich auch eine große Schalldämpfung haben, hat ihre Anwendung gefördert.

1.3 Wärmeübergang und Wärmedurchgang (*stationär*)

1.3.1 Wärmeübergang

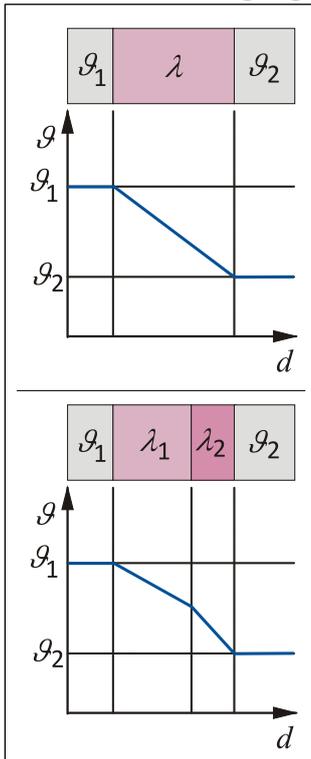


Bild 2: Wärmeleitung

In einer homogenen Wand, durch die senkrecht zu ihrer Oberfläche Wärme geleitet wird, erfolgt die Temperaturabnahme nach Gleichung (1) im Bereich der Schichtdicke d linear zwischen der wärmeren und kälteren Seite (**Bild 2**). Besteht eine Wand aus mehreren Schichten, so verläuft die Temperaturabnahme in gut leitenden Stoffen schwächer als in Wärmeisolierstoffen. Wenn die Trennwand aber an einen flüssigen oder gasförmigen Stoff grenzt, entsteht in der Grenzschicht eine Strömung. Die Wärmeübertragung erfolgt dann nicht nur durch Wärmeleitung, sondern auch durch Wärmeströmung. Die gesamte Wärmeübertragung einer Oberfläche auf eine Flüssigkeit oder ein Gas bezeichnet man als Wärmeübergang.

Hat man z.B. einen Behälter mit warmem Wasser, der durch eine Wand von der umgebenden Luft getrennt ist (**Bild 3**), so kühlt sich an der Innenseite der Wand das Wasser ab und sinkt nach unten, während warmes Wasser aus dem Innern des Behälters nachströmt. An der Außenseite steigt die erwärmte Luft hoch, und von unten strömt kältere Luft nach.

Infolge dieser Strömungen bleiben in den beiden Grenzschichten die Temperaturunterschiede $\Delta\vartheta_i$ (*innen*) und $\Delta\vartheta_a$ (*außen*) bestehen. Von der gesamten Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a$ liegt dann nur noch ein Teil zwischen den Oberflächen der Wand $\Delta\vartheta_w$.

Die Summe aller Teilterperaturdifferenzen ergibt den gesamten Temperaturunterschied

$$\Delta\vartheta = \Delta\vartheta_i + \Delta\vartheta_w + \Delta\vartheta_a .$$

Zur Berechnung des Wärmeüberganges an den Grenzflächen führt man den Wärmeübergangskoeffizienten α ein, der angibt, welche Wärmemenge von 1m^2 der Fläche in 1s übertragen wird, wenn der in der Grenzschicht entstehende Temperaturunterschied 1K beträgt.

Die bei einem Wärmeübergang von einer Wandfläche auf eine Flüssigkeit oder ein Gas übertragene Wärmemenge berechnet sich nun mit dem Wärmeübergangskoeffizienten nach der Formel:

$$Q = \alpha \cdot A \cdot t \cdot \Delta\vartheta_i \quad (2)$$

$$[\alpha] = \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$$

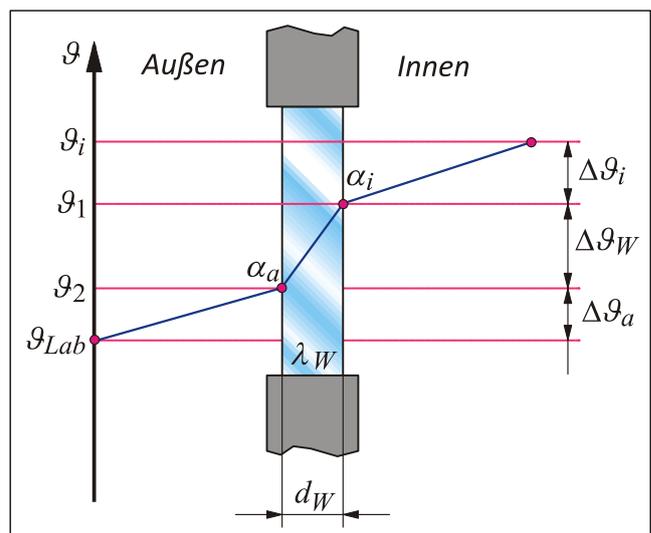


Bild 3: Wärmeübergang und -durchgang

1.3.2 Wärmedurchgang

Eine Wärmemenge, die vom Innern eines Behälters auf die Umgebung übergeht, muss zuerst durch die Grenzschicht auf der Innenseite der Wand, dann durch die Trennwand selbst und schließlich durch die äußere Grenzschicht hindurchgehen. Da sich bei zeitlich gleichbleibender (*stationärer*) Temperaturverteilung nirgends Wärme aufspeichern kann, muss der hindurchgehende Wärmestrom

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t}$$

bei allen Flächen und Schichten gleich sein. Kennzeichnet man die Innenfläche durch den Index i , die Außenflächen durch a und die Wand durch w , so gelten die Gleichungen:

$$\dot{Q} = \alpha_i \cdot A \cdot \Delta\vartheta_i \quad (3)$$

$$\dot{Q} = \frac{\lambda_w}{d_w} \cdot A \cdot \Delta\vartheta_w \quad (4)$$

$$\dot{Q} = \alpha_a \cdot A \cdot \Delta\vartheta_a \quad (5)$$

Multipliziert man die Gleichungen mit $\frac{1}{\alpha_i}$, $\frac{d_w}{\lambda_w}$, $\frac{1}{\alpha_a}$ und addiert sie dann, so folgt:

$$\dot{Q} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_a} \right) = A \cdot (\Delta\vartheta_i + \Delta\vartheta_w + \Delta\vartheta_a) = A \cdot \Delta\vartheta$$

Setzt man für den Klammerausdruck auf der linken Seite $1/k$, wobei k als Wärmedurchgangskoeffizient bezeichnet wird, so gelten zur Berechnung von \dot{Q} und k die folgenden Gleichungen:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta\vartheta \quad \frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_w}{\lambda_w} + \frac{1}{\alpha_a} \quad (6)$$

Zur Berechnung der einzelnen Temperaturdifferenzen löst man die drei Ausgangsgleichungen (3), (4) und (5) nach den Temperaturunterschieden auf und erhält mit

$$\frac{\dot{Q}}{A} = k \cdot \Delta\vartheta$$

den Temperaturunterschied der inneren Grenzschicht: $\Delta\vartheta_i = \frac{k}{\alpha_i} \cdot \Delta\vartheta$,

den Temperaturunterschied der Wand: $\Delta\vartheta_w = k \cdot \frac{d_w}{\lambda_w} \cdot \Delta\vartheta$,

den Temperaturunterschied der äußeren Grenzschicht: $\Delta\vartheta_a = \frac{k}{\alpha_a} \cdot \Delta\vartheta$,

sowie den Temperaturunterschied aus Innen- und Außentemperatur: $\Delta\vartheta = \vartheta_i - \vartheta_a$

$$\text{oder} \quad \Delta\vartheta_i : \Delta\vartheta_w : \Delta\vartheta_a : \Delta\vartheta = \frac{1}{\alpha_i} : \frac{d_w}{\lambda_w} : \frac{1}{\alpha_a} : \frac{1}{k} \quad (7)$$

Oftmals kommt es vor, dass in dieser Gleichung ein oder mehrere Glieder im Vergleich zu den anderen so klein sind, dass man sie vernachlässigen darf.

Die Gleichungen des Wärmedurchganges entsprechen genau den Gleichungen für in Reihe geschaltete elektrische Widerstände.

Der Temperaturunterschied $\Delta\vartheta$ steht für die Spannung U und der Wärmestrom \dot{Q} für den elektrischen Strom I . Die Ausdrücke $d/(\lambda \cdot A)$, $1/(\alpha \cdot A)$ und $1/(k \cdot A)$ entsprechen den elektrischen Widerständen. Deshalb bezeichnet werden sie auch als Wärmeleitwiderstand, Wärmeübergangswiderstand und Wärmedurchgangswiderstand bezeichnet.

Analog zur Elektrizitätslehre kann man also den Satz aufstellen:

Der gesamte Wärmedurchgangswiderstand einer Trennwand ist die Summe aus Wärmeübergangs- und Wärmeleitwiderständen.

Alle unter **Abschnitt 1.3** gemachten Ausführungen gelten für einen stationären Zustand. Das Aufwärmen und Abkühlen durch Lufttemperaturänderungen bzw. Sonneneinstrahlung wird durch die Wärmekapazität C der Wand bestimmt:

$$C = c \cdot m \qquad [C] = \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \qquad (8)$$

c: spezifische Wärmekapazität der Wand

m: Masse der Wand

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe 1: Temperaturunterschiede versuchen sich stets auszugleichen. Wärme breitet sich deshalb immer von Stellen höherer Temperatur zu Stellen niedrigerer Temperatur aus. Nennen Sie drei verschiedene Arten dieser Wärmeausbreitung.

Aufgabe 2: Erläutern Sie, was gibt der Wärmeübergangskoeffizient α an und wozu dient er?

Aufgabe 3: In einem geschlossenen Raum herrscht eine Innentemperatur $\vartheta_i=50^\circ\text{C}$. In diesem Raum befindet sich ein Fenster, welches mit einer Holzplatte der Stärke $d=2,5 \text{ cm}$ verschlossen ist. Die Innenseite dieser Platte hat eine Temperatur $\vartheta_1=40^\circ\text{C}$, die Außenseite eine Temperatur $\vartheta_2=25^\circ\text{C}$. Die Außentemperatur beträgt $\vartheta_a=20^\circ\text{C}$.

Der Wärmeübergangskoeffizient bei natürlicher Luftbewegung in geschlossenen Räumen für alle praktisch vorkommenden Wandmaterialien beträgt $\alpha_i=8,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Bestimmen Sie an Hand der **Abbildung 2** die Differenzen der Innentemperatur $\Delta\vartheta_i$, der Außentemperatur $\Delta\vartheta_a$ und der Wandtemperatur $\Delta\vartheta_w$.
- Berechnen Sie die Wärmeleitfähigkeit der Wand λ_w , den Wärmeübergangskoeffizienten nach außen α_a und den Wärmeübergangskoeffizienten k unter Verwendung der Gleichungen (3) bis (7).

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Thermohaus mit elektronischer Heizungsregelung, 4 digitale Temperaturmessgeräte (*GTH 1170*) mit Thermoelementen NiCr-Ni, ein digitales Temperaturmessgerät (*GTH 1200*) mit Thermoelement NiCr-Ni, Stoppuhr, Rotlichtlampe (150 W)

2.2.2 Versuchshinweise

Hinweis: *Dieser Versuch erfordert **über 80 Minuten** reine Messzeit und ist nur bei exakter Vorbereitung und zügiger Durchführung in einer Praktikumseinheit zu schaffen!*

Das Thermohaus ist während des Versuches mit folgenden Wänden versehen:

- Holz ($d=1$ cm),
- Holz ($d=2$ cm),
- Styropor ($d=2$ cm),
- Einfachglas ($d=0,5$ cm).

Aufgabe 1a) Messung von Wandtemperaturen während der Aufheizphase

Thermoelemente sind bei Beginn der Messung angeschlossen:

- 1 - Innenwand Holz (2 cm) (**1-i**)
- 2 - Außenwand Holz (2 cm) (**1-a**)
- 3 - Innenwand Styropor (**2-i**)
- 4 - Außenwand Styropor (**2-a**)
- 5 - Die Innenraumtemperatur des Thermohauses wird mit einem gesonderten digitalen Thermometer gemessen.

Achtung: *Die Anschlüsse der Messkabel dürfen nicht mechanisch beansprucht werden.*

- Schalten Sie den Temperaturregler an der Heizungsregelung auf den **4-ten** Teilstrich.
- Beginnen Sie die Zeitmessung mit dem Einschalten der Heizungsregelung.
- Lesen Sie die **5 Temperaturen jede 2. Minute** für eine Gesamtdauer **von 30 Minuten** ab.

Aufgabe 1b) Zusätzliche Wärmebestrahlung von folgenden Wänden:

- Holzwand (2 cm)
- Styroporwand
- Glasfenster
- Bestrahlen Sie zuerst **5 Minuten** lang in einem Abstand von **ca. 20 cm** mit der Rotlichtlampe die Holzwand (2 cm) und lesen Sie **jede Minute** alle **5 Temperaturen** ab.
- Schalten Sie dann die Rotlichtlampe aus und messen Sie **5 Minuten** lang mit der gleichen Schrittweite weiter.
- Wiederholen Sie die Messung für die Styroporwand und für das Glasfenster.

Hinweis: *Die elektrische Heizung des Thermohauses bleibt die ganze Zeit eingeschaltet.*

Aufgabe 2: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Holz, Glas und Styropor

- Schalten Sie die Heizung jetzt aus. Der stationäre Zustand zur Bestimmung der geforderten Koeffizienten ist nach der Durchführung der **Aufgabe 1 (ca. 70 min)** erreicht.
- Messen Sie **alle 5 Temperaturen** der angeschlossenen Wände (**von Aufgabe 1**) **minutenweise für 5 Minuten**.
- Tauschen Sie die angeschlossenen Thermoelemente am Temperaturmessgerät aus.

Achtung:

Die Anschlüsse der Messkabel dürfen nicht mechanisch beansprucht werden.

- 1 - Innenwand Glas (3-i)
- 2 - Außenwand Glas (3-a)
- 3 - Innenwand Holz (1cm) (4-i)
- 4 - Außenwand Holz (1cm) (4-a)
- Messen Sie erneut **alle 5 Temperaturen** der angeschlossenen Wände **minutenweise** für **5 Minuten**.
- Messen Sie nach Abschluss aller Messungen die Raumtemperatur des Labors.

2.3 Versuchsauswertung**Aufgabe 1:** Graphische Darstellung der Temperaturverläufe

- Stellen Sie die Temperaturverläufe während der Aufheizphase (*Fühler 1 bis 4 und Innenfühler*) zusammen in einem Diagramm der Funktion $\vartheta_{1...5} = f(t)$ graphisch dar.
- Erstellen Sie für die 5 min Bestrahlung sowie die 5 min Bestrahlungspausen ein Diagramm der Funktion $\vartheta_{1...5} = f(t)$. Dabei ist für jede untersuchte Wand (2cm-Holz; Styropor; Glas) **je ein Diagramm** anzufertigen.
- Tragen Sie die unterschiedlich aufgenommenen Phasen entsprechend der Aufgabenstellung mit ein und interpretieren Sie diese.

Aufgabe 2: Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten

Gegeben: Der Wärmeübergangskoeffizient beträgt bei natürlicher Luftbewegung in geschlossenen Räumen für alle praktisch vorkommenden Wandmaterialien $\alpha_i = 8,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

- Berechnen Sie unter Verwendung der Mittelwerte der jeweiligen Temperaturen sowie der Gleichungen (3) bis (7) die Wärmedurchgangskoeffizienten (*k*-Werte) und die Wärmeleitfähigkeiten λ für die gemessenen 4 Wände.
- Vergleichen Sie tabellarisch die ermittelten Wärmeleitfähigkeitskoeffizienten λ mit den Tabellenwerten
- Schätzen Sie die systematische und zufällige Abweichung ab. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

Tabellenwerte:

Holz (*Fichte, Sperrholz*): $\lambda = 0,14 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 Styropor: $\lambda = 0,036 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
 Glas: $\lambda = (0,7...1,1) \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$