

## Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen nach dem Prinzip der Wärmeflussplatte

Aufzeichnung und Auswertung mit CASSY

### Versuchsziele

- Aufnahme des Temperaturverlaufes an einer Baustoffplatte in Abhängigkeit von der Zeit.
- Qualitative Beobachtung des Einstellens des thermischen Gleichgewichtes.
- Bestimmung der Leitfähigkeit einer Baustoffplatte.

### Grundlagen

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  ist als Proportionalitätskonstante in der Beziehung zwischen dem Wärmefluss  $\frac{\Delta Q}{\Delta t}$ , der die Probe durchsetzt, und der Temperaturdifferenz  $\Delta \vartheta$  auf den beiden Seiten der Probe definiert:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda \cdot \frac{A}{d} \cdot \Delta \vartheta$$

mit  $d$ : Dicke der Probe  
 $A$ : Fläche der Probe.

Im Gegensatz zu elektrischen Strömen gibt es für Wärmeströmungen keine perfekten Isolatoren, so dass „Wärmelecks“ eine genaue Messung des Wärmeflusses erschweren. Der Wärmefluss entspricht nicht genau der in das System fließenden Energie.

In diesem Versuch wird die Wärmeleitfähigkeit nach dem Prinzip der Wärmeflussplatte bestimmt, ein relatives Verfahren. Bei diesem Verfahren werden zwei Platten aufeinander gelegt und vom gleichen Wärmefluss durchsetzt. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_x$  einer unbekanntes Baustoffplatte (Probe) kann dann mit dem bekannten Wert  $\lambda_R$  einer Referenzplatte berechnet werden. Die Referenzplatte wird auch „Wärmeflussplatte“ genannt.

Es gilt:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda_x \cdot \left(\frac{A_x}{d_x}\right) \cdot \Delta \vartheta_x = \lambda_R \cdot \left(\frac{A_R}{d_R}\right) \cdot \Delta \vartheta_R .$$

Dabei ist  $\Delta \vartheta_R$  die Temperaturdifferenz an der Referenzplatte und  $\Delta \vartheta_x$  die Temperaturdifferenz an der unbekanntes Baustoffplatte.

In den Versuchen haben die beiden Platten gleiche Dicke  $d_x = d_R$  und gleiche Fläche  $A_x = A_R$ . Damit gilt in diesem Sonderfall:

$$\lambda_x = \lambda_R \cdot \left(\frac{\Delta \vartheta_R}{\Delta \vartheta_x}\right).$$

Es werden jeweils die Temperaturen

- an der Außenseite der oben liegenden Baustoffplatte (hier Eis)  $\vartheta_o$ ,
- zwischen den beiden Baustoffplatte  $\vartheta_m$  und
- an der Unterseite der unteren Baustoffplatte  $\vartheta_u$ , d.h. die Innentemperatur der Kammer gemessen.



Abb. 1: Versuchsaufbau: Wärmeleitfähigkeitsbestimmung nach dem Prinzip der Wärmeflussplatte.

**Geräte**

1	Wärmemesskammer .....	389 29
1	Baustoffproben zu Wärmemesskammer .....	389 30
1	Transformator 2...12 V, 120 W .....	521 25
1	Sensor-CASSY 2 .....	524 013
1	CASSY Lab 2 .....	524 220
2	NiCr-Ni-Adapter S, Typ K .....	524 0673
3	Temperaturfühler NiCr-Ni, 1,5 mm, Typ K.....	529 676
2	Experimentierkabel 32 A, 100 cm, sw .....	501 33
	Eis	
	dünne Plastikfolie	
1	PC mit Windows XP/Vista/7/8	

Es sind zwei Fälle zu unterscheiden.

Falls die Referenzplatte unten liegt gilt

$$\Delta\vartheta_R = \vartheta_u - \vartheta_m \quad \text{und} \quad \Delta\vartheta_x = \vartheta_m - \vartheta_o.$$

Die Wärmeleitfähigkeit der unbekanntenen Baustoffplatte ergibt sich somit zu

$$\lambda_x = \lambda_r \cdot \left( \frac{\vartheta_u - \vartheta_m}{\vartheta_m - \vartheta_o} \right).$$

Falls die Referenzplatte oben liegt ergibt sich:

$$\lambda_x = \lambda_r \cdot \left( \frac{\vartheta_m - \vartheta_o}{\vartheta_u - \vartheta_m} \right).$$

Die verwendeten Formeln sind im thermischen Gleichgewicht gültig, d.h. im stationären Fall in dem die Temperatur an jeder Stelle zeitlich konstant ist.

Das System ist nicht unmittelbar nach dem Einschalten des Plattenheizers im thermischen Gleichgewicht. Um die Temperaturdifferenz im thermischen Gleichgewicht zu erhalten wird der zeitliche Verlauf der Innentemperatur über eine ausreichende Zeit (Größenordnung 1,5 Stunden) aufgenommen. Die zeitliche Temperaturänderung ist proportional zur Temperatur plus einer Konstanten:

$$\frac{\Delta\vartheta}{\Delta t} = a \cdot \vartheta + b.$$

Die Lösung dieser Gleichung für die Temperatur als Funktion der Zeit  $\vartheta(t)$  lautet:

$$\vartheta(t) = \vartheta_{TG} - \vartheta_{Diff} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

mit:

- $\vartheta_{TG}$  : Temperatur im thermischen Gleichgewicht
- $\vartheta_{Diff} = \vartheta_{TG} - \vartheta_{Anfang}$  : Temperaturdifferenz
- $\tau$  : Zeitkonstante.

Die Temperatur im thermischen Gleichgewicht an der beheizten Seite der Baustoffprobe, bzw. zwischen den beiden Platten, ergibt sich durch die Anpassung der Funktion von der Form

$$f(x) = A - B \cdot \exp(-x/C)$$

an die im Versuch aufgenommenen Werte. Der durch die Anpassung erhaltene Parameter A entspricht dann genau der gewünschten Temperatur  $\vartheta_{TG}$ . Diese ist dann gleich  $\vartheta_u$  bzw.  $\vartheta_m$ .

Durch das Eis wird die Außentemperatur an der oberen Seite der oberen Baustoffplatte tief und vor allem konstant gehalten. Da es dennoch zu kleinen Temperaturschwankungen kommen kann, werden die Werte der Außentemperatur gemittelt und dann mit diesem Mittelwert  $\vartheta_o$  die Temperaturdifferenz berechnet.

**Versuchsaufbau**

Der Versuchsaufbau ist in Abb. 1 dargestellt.

*Hinweis: Die Spanplatte sowie die Rohacell-Platte werden nach innen, d.h. zum Plattenheizer gelegt. Dagegen ist die Fermacell-Platte nach außen, d.h. zum Eis, zu legen.*

- Plattenheizer in die Wärmemesskammer einsetzen.
- Zwei Baustoffplatten zum Zusammenbau zu einem „Sandwich“ und anschließenden Einbau in die Wärmemesskammer vorbereiten:
- Ein Kontaktplättchen aus Aluminium in die dafür vorgesehene kreisförmige Aussparung auf der innen liegenden Baustoffplatte am Ende der Nut mit Wärmeleitpaste einlegen. Dabei muss das Kontaktplättchen so gedreht sein, dass die Aussparung in der Verlängerung der Nut liegt.
- Die Wärmeleitpaste lediglich auf das Kontaktplättchen auftragen.
- Eine dünne Aluminiumplatte (Dicke: 0,3 mm) mit der schwarzen Seite nach außen vorsichtig, d.h. ohne sie zu verbiegen, auf die mit Wärmeleitpaste vorbereitete Seite dieser Baustoffplatte legen und die beiden Platten zusammendrücken.
- Diese Schritte für die andere Seite wiederholen, jedoch eine unlackierte Aluminiumplatte (Dicke: 0,5 mm) verwenden. Die unlackierte Aluminiumplatte liegt anschließend zwischen den beiden Baustoffplatten.
- Auf die außen liegenden Baustoffplatte wiederum eine dünne Aluminiumplatte legen und andrücken.
- Nun die beidseitig mit Aluminium kaschierte Platte mit der schwarz lackierten Seite nach unten in die Wärmemesskammer einlegen. Dabei ist zu beachten, dass die Stellen zum Einführen der Temperatursensoren (die Enden der Nut) zur Seite der Wärmemesskammer mit zwei Öffnungen gedreht werden müssen.
- Die einseitig mit Aluminium kaschierte Platte anschließend mit der schwarzen Seite nach oben auf die in der Wärmemesskammer bereits eingelegte Platte legen.
- Zu beachten ist, dass die unlackierte Aluminiumplatte zwischen den Baustoffplatten liegt und, dass die Stellen zum Einführen der Temperaturfühler (die Enden der Nut) der beiden Baustoffplatten um 180° verdreht sind.
- Zunächst die Spitze der Temperaturfühler vorsichtig, d.h. ohne diese dabei zu verbiegen, durch die Bohrung der Gummistopfen (Durchmesser: 1,5 mm) stechen. Diese noch nicht in die Wärmemesskammer einführen!
- Die Temperaturfühler an der Ober- und der Unterseite sowie zwischen den beiden Baustoffplatten einführen. Bei Bedarf die Baustoffprobe mit dem Montagehacken etwas anheben.
- Temperaturfühler mit Hilfe des NiCr-Ni-Adapter S gemäß Abb. 1 an das Sensor-CASSY anschließen.
- Den Transformator an die Anschlüsse des Plattenheizers anschließen. Transformator noch nicht einschalten!
- Dünne, aber wasserdichte Kunststoffolie (z.B. Frischehaltefolie) über der Wärmemesskammer ausbreiten. Eine Tüte mit Eisstücken auf die obere Aluminiumplatte legen. Es ist darauf zu achten, dass kein Wasser in die Kammer oder auf die Kabel gelangen kann.

Hinweise: Die Tüte darf nicht zu klein sein. Das Eis muss einen möglichst guten Kontakt mit der Aluminiumplatte haben. Je kleiner die Eisstücke sind, desto besser legt sich das Eis auf die Baustoffprobe. Es eignet sich zusätzlich ein schwerer Gegenstand, der auf die Tüte gestellt werden kann ohne diese zu beschädigen.

**Versuchsdurchführung**

**Sicherheitshinweis**



Die Wärmemesskammer, Wandmaterialien und Baustoffplatten nicht über 60 °C erhitzen!

- [Einstellungen in CASSY Lab 2 laden.](#)

Hinweis: Ggf. die Temperaturfühler bevor sie in die Messkammer gesteckt werden bei gleicher Temperatur – z.B. in einem Wasserbad – in CASSY Lab 2 korrigieren, d.h. auf gleiche Temperaturanzeige bringen.

- Transformator einschalten. Die Messung noch nicht starten.
- Temperaturen  $\vartheta_{A11}$ ,  $\vartheta_{A12}$  und  $\vartheta_{B11}$  beobachten.

Hinweis: Je nach Temperatur des Eises kann diese durchaus deutlich unter 0 °C liegen. Um diese Temperatur während der Messung möglichst konstant halten zu können, empfiehlt sich es, dass diese Temperatur zwischen -2 °C und +4 °C liegt.

- Warten bis sich die tiefere Temperatur nicht mehr ändert.
- Messung mit  starten.
- Die Temperatur an der inneren Seite steigt, während die Außentemperatur unter dem Eis konstant bleibt. Der Raum zwischen den beiden Baustoffplatten ist den beiden Effekten ausgesetzt. Erfahrungsgemäß sinkt die mittlere Temperatur um zum Ende der Messung zu steigen.
- Falls die Außentemperatur steigt (schon bei 0,5 °C Differenz) den Kontakt mit dem Eis sehr vorsichtig nachbessern. Diese Korrektur während der Messung bei Bedarf wiederholen.
- Falls die Innen-Temperatur 60 °C erreicht, Transformator ausschalten und den Versuch mit kleinerer Spannung bzw. Leistung wiederholen.
- Falls sich die innere Temperatur nur noch langsam oder nicht mehr ändert (etwa bis 0,15 °C pro Minute) kann die Messung mit  gestoppt werden.
- Transformator ausschalten!

Hinweis: Beim Abbau müssen zuerst die Temperaturfühler entfernt werden. Erst danach können die Baustoffplatten mit dem Montagehacken herausgehoben werden.

**Messbeispiel**

In den Abbildungen 2. bis 5. sind jeweils die zeitlichen Temperaturverläufe für die verschiedenen Baustoffplatten dargestellt. Aus der Kurve der Innentemperatur (jeweils obere Kurve) und der mittleren Temperatur (jeweils mittlere Kurve) werden durch eine Anpassung die Temperaturen  $\vartheta_u$  und  $\vartheta_m$  im thermischen Gleichgewicht bestimmt. Die durchgezogene Linie ist gerade die aus der Anpassung erhaltene Funktion. Der Mittelwert der Außentemperatur (jeweils untere Kurve, Eis) ergibt die Temperatur  $\vartheta_o$ . Daraus wird die Temperaturdifferenzen  $\Delta\vartheta_R$  bzw.  $\Delta\vartheta_x$  berechnet.

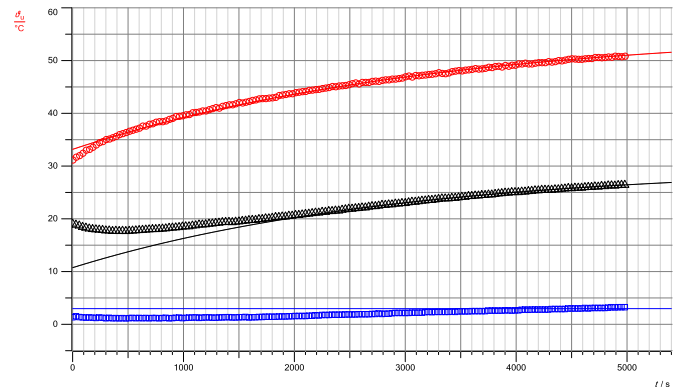


Abb. 2: Beide Baustoffproben aus Polystyrol.

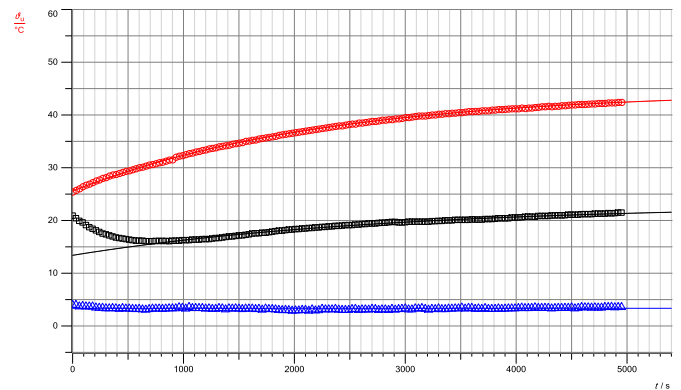


Abb. 3: Untere Baustoffprobe aus Holzspan.

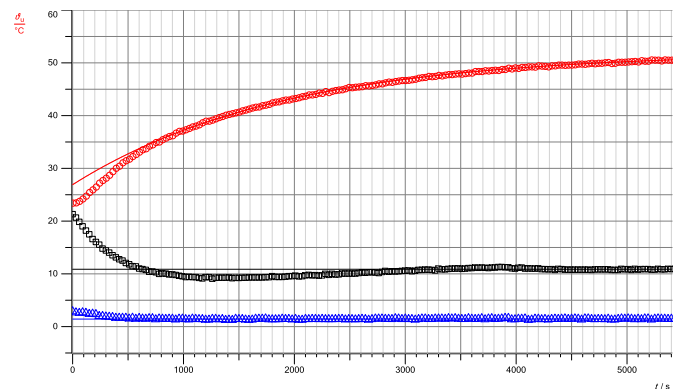


Abb. 4: Untere Baustoffprobe aus Rohacell (Isolierschaum)

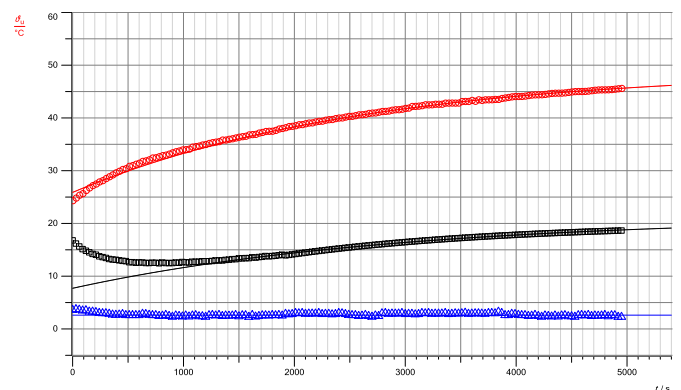


Abb. 5: Obere Baustoffprobe aus Fermacell (Baugips)

**Auswertung**

In den Experimenten besteht die Wärmeflussplatte jeweils aus Polystyrol mit der Wärmeleitfähigkeit

$$\lambda_r = 0,17 \frac{W}{m \cdot K}$$

Tab. 1: Messergebnisse mit den aus den Kurven extrapolierten Endtemperaturen

Unbekannte Bauplatte	Polystyrol	Span	Rohacell	Fermacell
$\frac{U}{V}$	8	8	6	8
außen	Eis			
$\vartheta_o$ °C	3	3	1	3
Obere Platte	Polystyrol	Polystyrol	Polystyrol	Fermacell
$\vartheta_m$ °C	30	23	11	21
Untere Platte	Polystyrol	Span	Rohacell	Polystyrol
$\vartheta_u$ °C	56	45	52	49
innen	Wärmemesskammer mit Plattenheizer			

Tab. 2: Berechnung der Wärmeleitfähigkeiten

$\frac{A}{m^2}$	0,0225			
$\frac{d}{m}$	0,01			
$\frac{\lambda_r}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,17 (Polystyrol)			
$\frac{\Delta\vartheta_R}{K}$	27 (26)*	20	10	28
$\frac{\Delta\vartheta_X}{K}$	26 (27)*	22	41	18
	<i>Polystyrol</i>	<i>Span</i>	<i>Rohacell</i>	<i>Fermacell</i>
$\frac{\lambda_x}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,18 (0,16)*	0,15	0,04	0,26
$\frac{\lambda_H}{\frac{W}{m \cdot K}}$	0,16 ... 0,18	0,07 ... 0,17	0,02 ... 0,05	0,23 ... 0,28

\* In Klammern sind die Werte angegeben, wenn die untere Polystyrolplatte als Referenzplatte betrachtet wird.

Die Werte für  $\lambda_H$  sind Herstellerangaben.

**Bemerkung**

Bei der Herleitung der Formel  $\lambda_x = \lambda_r \cdot \left(\frac{\Delta\vartheta_R}{\Delta\vartheta_X}\right)$  wird vorausgesetzt, dass beide Baustoffplatten von derselben Wärmemenge durchsetzt werden. Da es aber zu kleinen, unvermeidlichen Wärmeverlusten zwischen den beiden Baustoffplatten kommt, ergibt sich für die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_t$  der Zusammenhang

$$\lambda_t = \lambda_r \cdot \left(\frac{\Delta\vartheta_R}{\Delta\vartheta_X}\right) \left(\frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}_X}\right) = \lambda_x \cdot \left(\frac{\dot{Q}_R}{\dot{Q}_X}\right)$$

Dabei ist  $\dot{Q}_R$  die durch die Referenzplatte und  $\dot{Q}_X$  die durch die unbekannte Baustoffplatte fließende Wärme. Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_x$  ist dabei die berechnete Wärmeleitfähigkeit (Tabelle 2). Für diese gilt also

$$\lambda_x = \lambda_t \cdot \left(\frac{\dot{Q}_X}{\dot{Q}_R}\right)$$

Da die Wärme aus dem Innenraum der Wärmemesskammer fließt, ist die Wärme, die die innen liegende Baustoffplatte durchsetzt, größer als Wärme, die die oben liegende Baustoffplatte durchsetzt.

Falls die Referenzplatte oben liegt (d.h. hier im Fall der Rohacell- sowie der Spanplatte), so gilt  $\dot{Q}_X > \dot{Q}_R$  und die gemessene Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_x$  fällt etwas größer aus, als die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_t$ .

Die gemessene Wärmeleitfähigkeit ist dagegen etwas kleiner, als die tatsächliche, falls die Referenzplatte innen liegt (hier im Fall der Fermacellplatte).