Technische Universität Ilmenau
Institut für Werkstofftechnik
Praktikum Werkstoffe

Ausgabe: Januar 2010
DI D. Schmidt

Thermische Eigenschaften – ThermLeit

Wärmedurchgang und –leitfähigkeit

1 Thermische Dehnung

1.1 Grundlagen

Wird ein festes Material auf höhere Temperaturen gebracht, so dehnt es sich im Allgemeinen mehr oder weniger stark aus. Die thermische Dehnung liegt im Bereich von 10^{-4} bis 10^{-7} K^{-1} und ist damit scheinbar nur klein.

Die Größe der thermischen Dehnung kann als relative Längen- oder Volumenänderung ermittelt werden. Die gesamte thermische Volumenvergrößerung vom absoluten Nullpunkt bis zum Schmelzpunkt beträgt für kristalline Stoffe etwa 6 – 7 %, die Längenausdehnung etwa 2 % (Grüneisen'sche Regel).

Als linearen Ausdehnungskoeffizienten α bezeichnet man die relative Längenänderung eines Körpers in einer bestimmten Richtung, die bei einer Temperaturerhöhung um 1 K auftritt; die relative Volumenänderung bei einer Temperaturerhöhung um 1 K wird als kubischer Ausdehnungskoeffizient β bezeichnet.

Es gilt:

$$\beta = \frac{(T_{T+1} - V_T)}{V_T} \qquad (1)$$

mit V_T = Volumen bei der Temperatur T
V_{T+1} = Volumen bei der Temperatur T + 1

Für beliebige Temperaturerhöhungen lautet die Gleichung:

$$\beta = \frac{1}{V_0}\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_p \qquad (2)$$

Entsprechend gilt für den linearen Ausdehnungskoeffizienten:

$$\alpha = \frac{1}{l_o}\left(\frac{\partial l}{\partial T}\right)_p \tag{3}$$

Dabei bedeuten:

V_0	= Volumen bei Raumtemperatur
$\partial V/\partial T$	= Volumenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur
l_0	= Länge bei Raumtemperatur
$\partial l/\partial T$	= Längenänderung in Abhängigkeit von der Temperatur

α und β haben die Einheit K^{-1}. Zur Umrechnung des linearen in den kubischen Ausdehnungskoeffizienten kann man die Näherungsgleichung

$$\beta = 3 \cdot \alpha \tag{4}$$

benutzen.

Streng genommen gilt die Beziehung allerdings nur dann, wenn der Ausdehnungskoeffizient in allen drei Richtungen etwa gleich groß ist. Bei Verbindungen mit komplizierter Struktur, wie sie zum Beispiel in den meisten Silikaten vorliegen, ist diese Voraussetzung nicht immer erfüllt.

Im Allgemeinen ist der thermische Ausdehnungskoeffizient temperaturabhängig und nimmt mit der Temperatur schwach zu. Man gibt dann für einen größeren Temperaturbereich einen mittleren Ausdehnungskoeffizienten α an. Vom atomistischen Standpunkt aus kann die thermische Dehnung wie folgt erklärt werden:

Beim absoluten Nullpunkt ruhen alle Atome praktisch in ihrer Gleichgewichtslage, die gegeben ist durch die Forderung, dass die anziehenden und abstoßenden Kräfte sich die Waage halten. Bei Annäherung der Atome steigt die abstoßende Kraft schneller als die anziehende Kraft (siehe Abb. 1).

Die resultierende Kraftfunktion ist demnach in Bezug auf den Punkt der Ruhelage unsymmetrisch. Tritt nun bei der Temperaturerhöhung eine hauptsächlich symmetrische Schwingung der Atome um ihre Ruhelage ein, so ist bei Annäherung der Atome um die Strecke x ein größerer Widerstand zu überwinden als beim Auseinanderschwingen um die gleiche Strecke x. Die rücktreibende Kraft ist also bei Abstandsverkürzung größer als bei Abstandsvergrößerung der Atome. Infolge dieser Asymmetrie der Kräfte verschiebt sich die Ruhepunktlage zu größeren Abständen hin, das heißt, makroskopisch wird beim Erhitzen eine thermische Dehnung beobachtet.

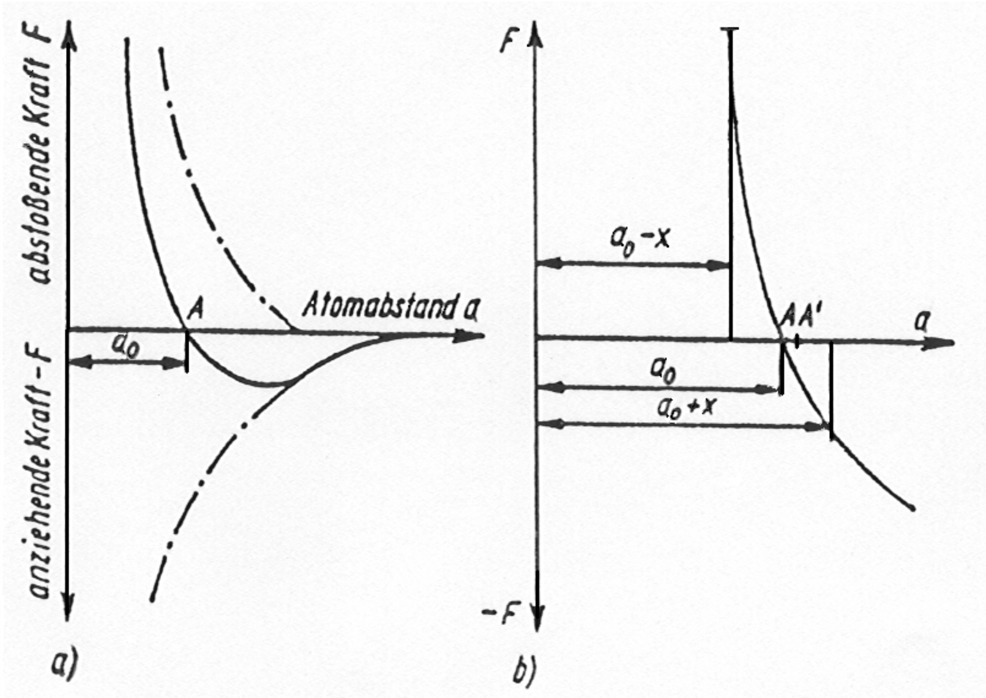


Abb. 1.: a) Kraftwirkungen zwischen Atomen als Funktion des Abstandes (schematisch)
b) resultierende Kraftfunktion in der Nähe der Gleichgewichtslage eines Atoms

In erster Näherung ist die thermische Dehnung für gleiche Temperaturintervalle umso geringer, je größer die Bindungskräfte zwischen den Bausteinen sind. Diese sind ihrerseits vom Abstand zwischen den Bausteinen und von deren Ladung abhängig in dem Sinn, dass sie dem Abstand der entgegengesetzt geladenen Ionen umgekehrt proportional und deren Ladung proportional sind. Auch der Gittertyp geht in die thermische Dehnung ein, und zwar wird sie bei Gleichheit von Wertigkeit und Abstand der Gitterbausteine mit zunehmender Koordinationszahl größer.

Strukturen mit hoher Raumausfüllung sind mit einer höheren thermischen Dehnung behaftet als locker gepackte Strukturen. Hieraus kann zum Beispiel der relativ niedrige Ausdehnungskoeffizient vieler Silikate, die nur eine geringe Packungsdichte aufweisen, plausibel gemacht werden.

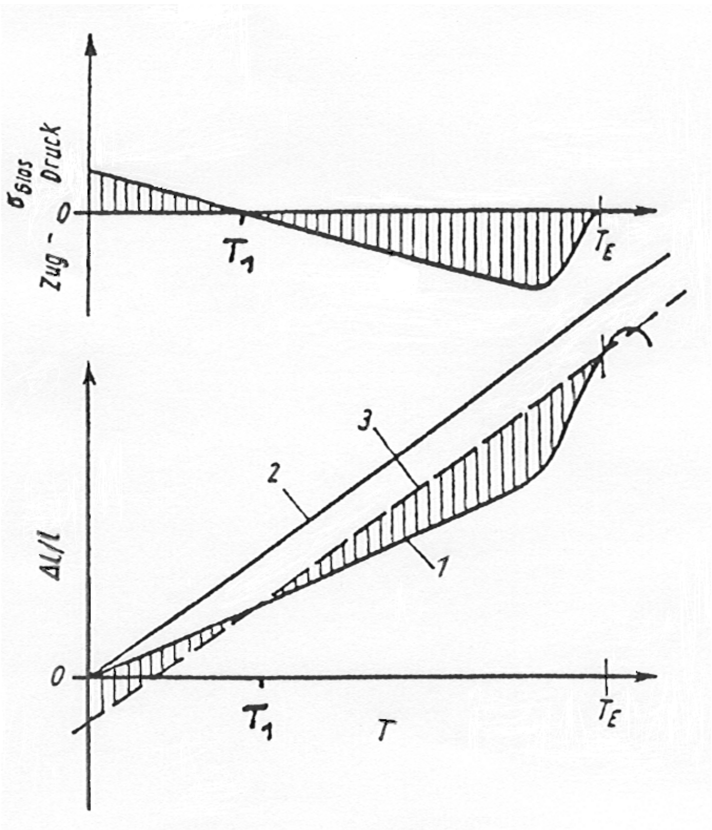
Kunststoffe haben im Vergleich zu Metallen und anorganisch-nichtmetallischen Werkstoffen eine hohe thermische Dehnung. Die begrenzte Anwendungstemperatur und der relativ niedrige E-Modul führen aber nur selten zu technischen Problemen.

Messmethoden

Zur Messung von Änderungen atomarer Abstände in Kristallstrukturen als Funktion der Temperatur muss die Verschiebung der Röntgenbeugungsreflexe bei Temperaturänderung ermittelt werden. Der große Vorteil der röntgenographischen Messung der thermischen Dehnung liegt darin, dass bei entsprechender Auswahl der vermessenen Linien die unterschiedlichen Wärmedehnungen in die verschiedenen kristallographischen Richtungen ohne Schwierigkeiten erfasst werden können. Bei polykristallinen und amorphen Werkstoffen sowie bei Kunststoffen kommen mechanische Messverfahren zur Anwendung. Die hierfür verwendeten Geräte heißen Dilatometer. Die einzelnen Gerätekonstruktionen unterscheiden sich durch die Anordnung der Probe, die Übertragung der Probendehnung auf das Registriersystem, die Eliminierung der Eigendehnung der Probenhalterung sowie die Art der Registrierung der Dehnungswerte auf mechanischem, elektrischem oder optischem Weg. Die Genauigkeit der Bestimmung wird mit etwa $\pm\, 0{,}05 \cdot 10^{-6}$ bis $\pm\, 0{,}8 \cdot 10^{-6}$ angegeben, wobei sie umso größer ist, je kleiner das Temperaturintervall bei der Messung und je höher der Absolutwert des Ausdehnungskoeffizienten ist.

Technische Bedeutung der Wärmedehnung

Für die Werkstoffanwendung ist der thermische Ausdehnungskoeffizient in zweierlei Hinsicht von Bedeutung. Zum einen spielt die thermische Ausdehnung bei Verbundwerkstoffen bzw. Werkstoffverbunden eine wichtige Rolle, da eine unterschiedliche Ausdehnung der miteinander verbundenen Werkstoffe Spannungen, Verzug oder gar Rissbildung hervorzurufen vermag.



T_E – fiktive Einfriertemperatur
1 – Ausdehnungskurve des Glases
2 – Ausdehnungskurve des Metalls
3 – Ausdehnungskurve des Metalls bis zum Schnitt der des Glases bei T_E verschoben

Abb. 2.: Dehnungsunterschied und Spannung einer Glas-Metallverschmelzung

In Abb. 2 sind Dehnungsunterschied und Spannung in einer Glas-Metallverschmelzung dargestellt. Bei T_E ist der Dehnungsunterschied willkürlich Null zu setzen, denn bei der Abkühlung der Verschmelzung nach ihrer Herstellung ist erst ab T_E der Dehnungsunterschied für die Spannungsbildung verantwortlich. Daher wird die Ausdehnungskurve des Metalls bis zum Schnittpunkt mit der des Glases bei T_E verschoben. Im Bereich $T < T_1$ wirken auf das Glas Druckspannungen; bei $T > T_1$ ist das Glas Zugspannungen ausgesetzt, was auf die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten zurückzuführen ist. Des Weiteren bestimmt der Ausdehnungskoeffizient wesentlich das Ausmaß der bei Temperaturänderungen in Bauteilen entstehenden, thermisch bedingten Eigenspannungen, die bei nichtplastischen Werkstoffen Sprödbruch, bei plastischen Werkstoffen Verzug herbeiführen können.

Die Temperaturwechselbeständigkeit von Glaswerkstoffen, das heißt die Beständigkeit gegen durch schroffen Temperaturwechsel verursachten Werkstoffbruch, steigt mit niedriger werdendem Ausdehnungskoeffizienten. Sie wird darüber hinaus noch von einer Reihe weiterer Faktoren beeinflusst. Dazu gehören die thermische Leitfähigkeit, die Festigkeit, der E-Modul, die plastische Verformbarkeit des Werkstoffes sowie die Geometrie des Bauteils.

Anwendungen der Dilatometrie

Neben der Bestimmung der Wärmedehnung wird das Dilatometer in der Glas- und Keramikindustrie für weitere vielfältige Untersuchungen herangezogen. Dies sind beispielsweise:

- Erfassung des Mineralbestandes von Rohstoffen, ungebrannten Massen und fertigen Werkstoffen. So haben die verschiedenen Tonminerale charakteristische Kurven, die zur qualitativen Analyse genutzt werden können.
- Erkennung von Ausdehnungsanomalien bzw. innerkristallinen Umordnungen
- Verfolgung von Sintervorgängen und Reaktionen beim Brennen
- Ermittlung der Feuchtigkeitsdehnung poröser Werkstoffe

1.2 Versuchsanordnung

Die thermische Ausdehnung wird mit Hilfe eines Absolut-Dilatometers der Fa. Linseis bestimmt. Das Gestänge zur Probenaufnahme und für die Messwertübertragung bestehen aus Kieselglas. Das Gestänge ist so konstruiert, dass die Eigendehnung weitestgehend kompensiert wird.

Die Erfassung der Temperatur-Ausdehnungskurve erfolgt über einen induktiven Wegaufnehmer und ein Thermoelement. Zu diesem Zweck wird der Prüfkörper zwischen einem festen und einem losen Auflagepunkt gehaltert, wobei er über einen Kieselglasstempel mit einem induktiven Wegaufnehmer in Verbindung steht.

Bei Ausdehnung der Probe als Folge der Erwärmung wird der Kieselglasstempel gegenüber der Kieselglashalterung verschoben und über den induktiven Wegaufnehmer die Längenänderung in ein elektrisches Signal umgewandelt. Dieses elektrische Signal wird mit der Thermospannung zeitgleich auf einem x-y-Schreiber aufgezeichnet. Zur Versuchsanordnung gehören folgende Geräte und Prüfkörper:

- Absolut-Dilatometer L 76/11
- Messschieber zur Bestimmung der Probenlänge l_0
- Probekörper mit einer Länge von etwa 12 mm und einem Durchmesser bis 6 mm mit plangeschliffenen Stirnflächen

1.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn des Praktikums sind Dilatometer und Schreiber einzuschalten. Vor der Messung eines Glases ist die Probe zu entspannen, indem diese auf mindestens 30 K über die Transformationstemperatur erwärmt wird. Diese Temperatur muss 30 min lang auf den Probekörper einwirken. Dann ist bis 100 K unterhalb der Transformationstemperatur mit einer konstanten Abkühlgeschwindigkeit von höchstens 3 K pro Minute abzukühlen. Danach sind die Abmessungen der Probe zu bestimmen (vorliegende Probe ist schon entspannt). Vorbereitung und Durchführung der Messung erfolgen entsprechend der Arbeitsplatz-anleitung.

1.4 Aufgaben

1. Nehmen Sie die Ausdehnungs-Temperatur-Kurve eines vorgegebenen Prüfkörpers im Temperaturbereich 20 °C bis 590 °C auf!
2. Berechnen Sie den linearen Ausdehnungskoeffizienten im Temperaturbereich 20 °C – 300 °C!

   Für lineare Teile des Kurvenverlaufes gilt die Gleichung:

$$\alpha_{T_1 - T_2} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \cdot \frac{1}{1000} + \alpha_K \qquad (5)$$

T_1	-	Anfangstemperatur in °C
T_2	-	Endtemperatur in °C
l_0	-	Messlänge des Prüfkörpers bei der Anfangstemperatur
Δl	-	Längenänderung des Prüfkörpers in mm bei einer Temperaturänderung von T_1 auf T_2 in K
α_K	-	thermischer Ausdehnungskoeffizient des zur Halterung und Messwertübertragung benutzten Kieselglasstabes im entsprechenden Temperaturbereich
1/1000	-	Gerätekonstante

Für α_K gelten nachstehende Werte:

Temperaturbereich	Längenausdehnungskoeffizient von Kieselglas in $10^{-6}\ K^{-1}$
20 … 100°C	0,54
20 … 200°C	0,57
20 … 300°C	0,58
20 … 400°C	0,57

3. Diskutieren Sie den Kurvenverlauf!

1.5 Kontrollfragen

1. Welche Bedeutung besitzt die thermische Dehnung für den Konstrukteur?
2. Geben sie die Definitionsgleichung des linearen Ausdehnungskoeffizienten an!
3. Erläutern Sie die thermische Dehnung vom atomistischen Standpunkt aus gesehen!
4. Wie kann die Größe der thermischen Dehnung ermittelt werden?
5. Erläutern Sie das Messprinzip eines Kieselglas-Dilatometers (verwendete Messgeräteanordnung)!
6. Warum muss in Formel (5) ein Korrekturwert berücksichtigt werden?
7. Deuten Sie den grundsätzlichen Verlauf der Dehnungs-Temperatur-Kurve für Gläser und Kunststoffe!
8. Nennen Sie für einige typische Werkstoffe (Metall, Legierung, Plaste, Glas) Größenordnungen für den thermischen Ausdehnungskoeffizienten!
9. Geben Sie die Beziehung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten zu anderen Werkstoffeigenschaften, z.B. der Temperaturwechselbeständigkeit, an!
10. Nennen Sie einige spezielle, weitere Anwendungen der Dilatometrie!

2 Wärmeleitung

2.1. Grundlagen

Die mikroskopische Theorie der Wärmeleitung beruht auf der Wärmebewegung der kleinsten Bausteine des wärmeleitenden Mediums. Bei Gasen sind dies die Atome oder Moleküle, deren kinetische Energie der Temperatur proportional ist. In Festkörpern, bei denen die Atome auf ihren Plätzen gebunden sind und nur um die Gleichgewichtslage herum schwingen können, übernehmen die quantisierten Gitterschwingungen, die als Phononen bezeichnet werden, den Energietransport. Ihre mittlere freie Weglänge hängt von einer Vielzahl von möglichen Streuprozessen ab, wie Streuung von Phononen untereinander (insbesondere Umklapp-Prozesse), Streuung an Gitterbaufehlern und an der Oberfläche sowie Streuung an anderen Quasiteilchen des Festkörpers.

Ähnlich wie beim Gas ergibt sich für die Wärmeleitfähigkeit durch Phononen

$$\lambda_{Ph} = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot c_V \cdot v \cdot l_{Ph} \qquad (6)$$

wobei ρ und c_V Dichte bzw. spezifische Wärmekapazität (bei konstantem Volumen) des Festkörpers darstellt, v die Schallgeschwindigkeit im Festkörper und l_{Ph} die mittlere freie Weglänge der Phononen bezeichnen. Da die Zahl der Phononen stark temperaturabhängig ist, gilt dies auch für die Häufigkeit der Streuprozesse und somit auch für l_{Ph}. Da auch c_V temperaturabhängig ist, kann der Verlauf der Wärmeleitfähigkeit von Festkörpern über der Temperatur recht kompliziert sein. So steigt λ_{Ph} zunächst stark an, um nach Überschreiten eines Maximums mit weiter steigender Temperatur wieder abzufallen (Abb. 3).

Hinzu kommt, dass im Festkörper nicht nur Phononen Energie transportieren können, sondern auch alle anderen Quasiteilchen. Besonders hervorzuheben sind dabei die Metalle mit ihrer hohen Dichte von Elektronen. Zwar können auf Grund des Pauli-Prinzips nur Elektronen auf der Fermi-Fläche am Energietransport teilnehmen (Bruchteil T/T_F aller Elektronen), sie tragen aber auch eine gegenüber normalen thermischen Energien viel höhere Energie (W_F = Fermi-Energie = $k \cdot T_F$).

Die Rechnung ergibt für die elektronische Wärmeleitfähigkeit λ_e die Beziehung (7)

$$\lambda_e = \frac{\pi}{6} \cdot k \cdot v_F \cdot l_e \cdot \left(\frac{T}{T_F}\right) \cdot n \qquad (7)$$

wobei l_e und n die mittlere freie Weglänge bzw. Dichte der Elektronen und v_F die Fermi-Geschwindigkeit ($W_F = m/2 \cdot v_F$, m-Elektronenmasse) bezeichnen.
Da man für den Transport von Elektronen in elektrischen Feldern, d. h. für die elektrische Leitfähigkeit σ eine ähnliche Beziehung findet ($\sigma = n \cdot e^2 \cdot l_e / m \cdot v_F$), folgt damit das

Wiedemann-Franz-Gesetz, nach dem der Quotient aus beiden Leitfähigkeiten linear mit der Temperatur zusammenhängt.

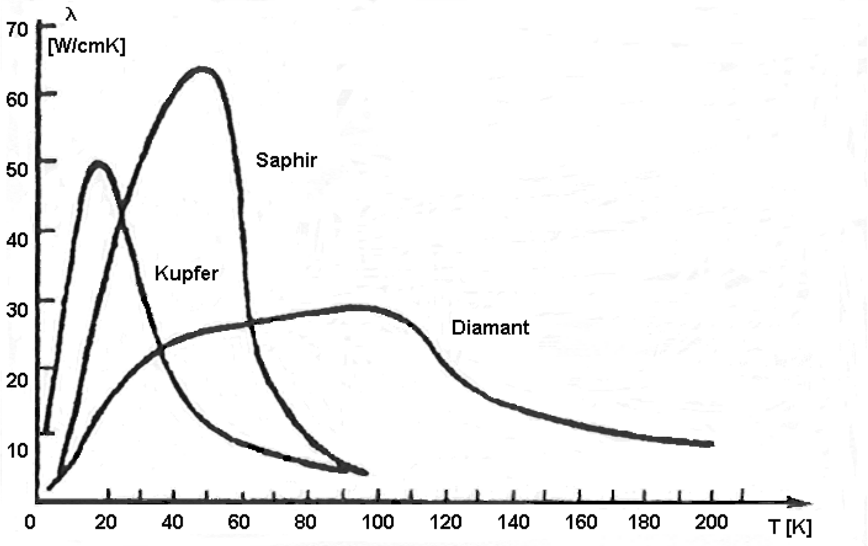


Abb. 3.: Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit

Auch die übrigen Quasiteilchen des Festkörpers tragen im Prinzip durch ihren Energietransport zur Wärmeleitfähigkeit bei ($\lambda_{ü}$). In der Regel ist das jedoch geringfügig, verglichen mit dem elektronischen Beitrag der Metalle oder dem Phononenanteil. Durch Streuung aller Teilchen untereinander sind die verschiedenen Leitungsprozesse miteinander verknüpft. Die Gesamtleitfähigkeit ergibt sich als Summe der Einzelleitfähigkeiten.

$$\lambda = \lambda_{Ph} \cdot \lambda_e \cdot \lambda_{Ü} \qquad (8)$$

In Isolatoren überwiegt die Wärmeleitfähigkeit durch Phononen, in Metallen durch Elektronen.

Phänomenologisch beschreibt man die Wärmeleitung durch den Wärmeenergiestrom (Wärmefluss)

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \qquad (9)$$

(Q = Wärmemenge, t = Zeit, dQ ist die während des Zeitintervalls dt geflossene Wärmemenge), der durch einen Temperaturgradienten dT/dx (T = Temperatur, x = Ortskoordinate, dT = die sich über dem Wegelement dx ergebende Temperaturdifferenz) erzeugt wird und durch eine Querschnittsfläche A fließt, wobei Strom und Gradient verschiedene Vorzeichen haben:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \qquad (10)$$

Dabei heißt λ die spezifische Wärmeleitfähigkeit (oder Wärmeleitzahl), die eine materialspezifische Größe und in der Regel temperaturabhängig ist. In Kristallen kann die Wärmeleitfähigkeit für verschiedene kristallographische Richtungen verschiedene Werte annehmen. Bezieht man den Temperaturgradienten auf eine endliche Strecke Δ (z. B. die Dicke einer Fensterscheibe), so wird mit dT/dx ≈ ΔT/Δx aus Gleichung (9)

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} = -k \cdot A \cdot \Delta T \qquad (11)$$

wobei k = λ/Δx Wärmedurchgangskoeffizient (k-Wert) heißt. Die Größe $R_{th} = \Delta x/(\lambda \cdot A)$ heißt auch thermischer Widerstand, so dass man in Anlehnung an das Ohmsche Gesetz die Beziehung $\Delta T = R_{th} \cdot \Phi$ formulieren kann (ΔT entspricht der Spannung). Handelt es sich um den Wärmeübergang von einem Körper zu seiner Umgebung (z. B. Luft, Flüssigkeit), so formuliert man

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} = -\alpha \cdot A \cdot \Delta T \qquad (12)$$

und bezeichnet α als Wärmeübergangskoeffizient (Wärmeübergangszahl).

2.2 Versuchsanordnung

Es stehen folgende Geräte zur Verfügung:

- Digitalmeter Prema 5017
- Datalogger Voltcraft K204
- Wärmeflussplatte
- 3 NiCr – Ni – Thermoelemente
- Heizplatte vom Typ PZ 28-1
- Probekörper

2.3 Versuchsdurchführung

Die Wärmeflussplatte ist auf der Metalloberfläche der Heizplatte so aufzubringen, dass sie glatt auf der Oberfläche liegt. Die Anschlüsse an das Messgerät sind zu installieren und die Thermoelemente entsprechend den Messgrößen zu positionieren. Danach ist die Heizplatte in Betrieb zu nehmen. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt entsprechend der Praktikumseinweisung. Zur Ermittlung der Wärmestromdichte q ist die Thermospannung aufzunehmen, wobei $q = c \cdot U_{th}$ (Kalibrierkonstante c = 51,4 W/(m^2·mV)) ist.

Bezeichnung der Messfühler:

- T_1 – Temperatur Proben-Innenseite: ϑ_I [°C]
- T_2 – Temperatur Proben-Oberseite: ϑ_O [°C]
- T_3 – Umgebungstemperatur : ϑ_L [°C]

2.4 Aufgaben

1. Ermitteln Sie die Wärmestromdichte q in Abhängigkeit von der Wandinnentemperatur und stellen Sie diese Beziehung grafisch dar.
2. Berechnen Sie für den stationären Fall bei 90 °C die spezifische Wärmeleitfähigkeit λ, den Wärmedurchgangskoeffizienten k sowie den Wärmeübergangskoeffizienten α zu einem vorgegebenen Punkt im Raum.
3. Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse!

2.5 Kontrollfragen

1. Wie erfolgt das Übertragen von Wärme in Festkörpern?
2. Wie unterscheidet sich die Wärmeleitung in Isolatoren von der in Metallen?
3. Wie lautet das Wärmeleitgesetz?
4. Was versteht man unter Wärmestromdichte?
5. Erläutern Sie die Bedeutung der Wärmeleitfähigkeitszahl!
6. Diskutieren Sie den Wärmeübergang!
7. Nennen Sie Kenngrößen des Wärmeübergangs!
8. Was versteht man unter Wärmedurchgang?
9. Diskutieren Sie den Wärmedurchgangs-Ansatz!
10. Nennen Sie für einige Werkstoffe (Metall, Glas, Porzellan, Plaste) die Wärmeleitfähigkeitszahlen!

LITERATUR

1. Schaaf, P.: Vorlesung „*Grundlagen der Werkstoffwissenschaft*“; Institut für Werkstofftechnik, TU Ilmenau, 2009/10
2. Elsner, N.: *Grundlagen der Technischen Thermodynamik*, Akademie-Verlag Berlin, 7. Auflage, 1988
3. Wagner, W.: *Wärmeübertragung: Grundlagen*; Kamprath-Reihe, Vogel-Verlag, Würzburg, 5. Auflage, 1998
4. Schatt, Worch: *Werkstoffwissenschaft*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Dresden, 9. Auflage, 2003
5. Menges, G.: *Werkstoffkunde der Kunststoffe*, Hanser Verlag München, 4. Auflage, 1998
6. DIN ISO 7991: *Bestimmung des mittleren thermischen Längenausdehnungs-koeffizienten*
7. DIN 4108: *Wärmeschutz im Hochbau*
8. Gröber, Ertz, Grigull: *Die Grundlagen der Technischen Thermodynamik*, Akademie-Verlag Berlin, 7. Auflage, 1988

ANSPRECHPARTNER / PRAKTIKUMSBETREUER:

Dr.-Ing. Kerstin Pfeifer
Tel.: 03677 – 69 1831
kerstin.pfeifer@tu-ilmenau.de
Arrheniusbau – Raum 230

Dipl.-Ing. Matthias Linß
Tel.: 03677 – 69 3162
matthias.linss@tu-ilmenau.de
Arrheniusbau – Raum 232