

**et**  
elektrotechnik

**mb**  
maschinenbau



James F. Shackelford

# Werkstofftechnologie für Ingenieure

Grundlagen – Prozesse – Anwendungen

6., überarbeitete Auflage

James F. Shackelford

# Werkstofftechnologie für Ingenieure

Grundlagen – Prozesse – Anwendungen

6., überarbeitete Auflage



---

ein Imprint von Pearson Education  
München • Boston • San Francisco • Harlow, England  
Don Mills, Ontario • Sydney • Mexico City  
Madrid • Amsterdam



Die Lösungen für alle Übungen finden Sie auf der Companion Website.

### Übung 7.1

Zeigen Sie, dass eine Wärmekapazität von  $3R$  einen brauchbaren Näherungswert für die spezifische Wärme von Kupfer darstellt, die in Tabelle 7.1 angegeben ist (siehe Beispiel 7.1).

## 7.2 Wärmeausdehnung

Eine steigende Temperatur führt zu größeren thermischen Schwingungen der Atome in einem Werkstoff und einer Zunahme des durchschnittlichen Trennungsabstands von benachbarten Atomen (siehe Abbildung 7.2). Im Allgemeinen nimmt die Länge des Werkstoffs in einer gegebenen Richtung  $L$  mit steigender Temperatur  $T$  zu. Diese Beziehung wird durch den **linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten**  $\alpha$  wiedergespiegelt, der durch

$$\alpha = \frac{dL}{LdT} \quad (7.4)$$

gegeben ist, wobei  $\alpha$  die Einheit  $\text{mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})$  hat. Tabelle 7.2 gibt Daten für die Wärmeausdehnung für verschiedene Werkstoffe an.



Eine Demonstration der Wärmeausdehnung und Daten zu thermischen Eigenschaften finden Sie auf der Companion Website.

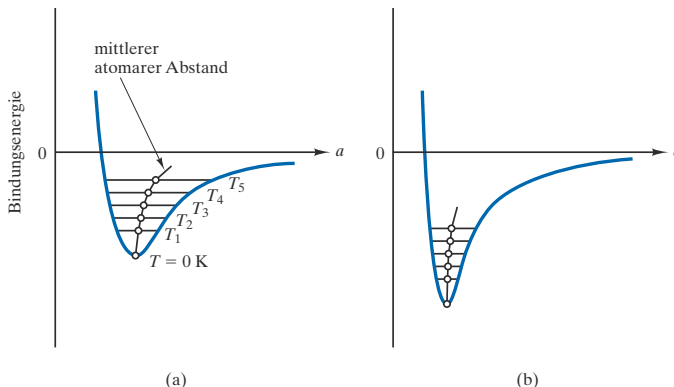


Abbildung 7.2: Diagramm der atomaren Bindungsenergie in Abhängigkeit des atomaren Abstands für einen schwach (a) und einen stark (b) gebundenen Festkörper. Die Wärmeausdehnung ist das Ergebnis eines zunehmenden Atomabstands bei steigender Temperatur. Die (durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten in Gleichung 7.4 dargestellte) Wirkung ist für die eher asymmetrische Energiemindele des schwach gebundenen Festkörpers größer. Wie Tabelle 7.3 zeigt, nehmen Schmelzpunkt und Elastizitätsmodul mit wachsender Bindungsfestigkeit zu.

Tabelle 7.2

**Werte des linearen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für verschiedene Werkstoffe**

Werkstoff	$\alpha$ [ $1/^\circ\text{C} \times 10^6$ ] Temperatur =		
	27 °C (300 K)	527 °C (800 K)	0 – 1.000 °C
<b>Metalle</b>			
Aluminium	23,2	33,8	
Kupfer	16,8	20,0	
Gold	14,1	16,5	
Nickel	12,7	16,8	
Silber	19,2	23,4	
Wolfram	4,5	4,8	
<b>Keramiken und Gläser</b>			
Mullite ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )			5,3
Porzellan			6,0
Schamotte			5,5
$\text{Al}_2\text{O}_3$			8,8
Spinell ( $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )			7,6
MgO			13,5
$\text{UO}_2$			10,0
$\text{ZrO}_2$ (stabilisiert)			10,0
SiC			4,7
Silikatglas			0,5
Kalknatronsilikatglas			9,0
<b>Polymere</b>			
Nylon 66	30-31		
Phenolische Werkstoffe	30-45		
Polyethylen (hohe Dichte)	149-301		
Polypropylen	68-104		
Polytetrafluorethylen (PTFE)	99		

Im Allgemeinen sind die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Keramiken und Gläsern kleiner als die für Metalle, die ihrerseits kleiner als diejenigen für Polymere sind. Die Unterschiede stehen mit der asymmetrischen Form der Energiemulde, wie in Abbildung 7.2 gezeigt, im Zusammenhang. Keramiken und Gläser haben im Allgemeinen tiefere Mulden (d.h. höhere Bindungsenergien), die auf ihre ionischen und kovalenten Bindungstypen zurückzuführen sind. Das Ergebnis ist eine symmetrischere Energiemulde mit relativ geringem Anwachsen des Atomabstands bei zunehmender Temperatur, wie es in Abbildung 7.2b zu sehen ist.

Der Elastizitätsmodul steht direkt mit der Ableitung der Bindungsenergiekurve nahe dem unteren Teil der Mulde (siehe *Abbildung 6.18*) in Beziehung. Daraus folgt: Je tiefer die Energiemulde ist, desto größer ist der Wert dieser Ableitung und folglich desto größer ist der Elastizitätsmodul. Darüber hinaus korrespondiert die stärkere Bindung infolge tieferer Energiemulden mit höheren Schmelzpunkten. Tabelle 7.3 fasst die Wechselbeziehungen zwischen Bindungsfestigkeit und Werkstoffeigenschaften zusammen.

Tabelle 7.3

### Korrelation von Bindungsfestigkeit und Werkstoffeigenschaften

#### Schwach gebundene Festkörper

Niedriger Schmelzpunkt

Niedriger Elastizitätsmodul

Hoher Wärmeausdehnungskoeffizient

#### Stark gebundene Festkörper

Hoher Schmelzpunkt

Hoher Elastizitätsmodul

Niedriger Wärmeausdehnungskoeffizient

Der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst ist eine Funktion der Temperatur. *Abbildung 7.3* zeigt den Verlauf des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten für keramische Werkstoffe über einem breiten Temperaturbereich.

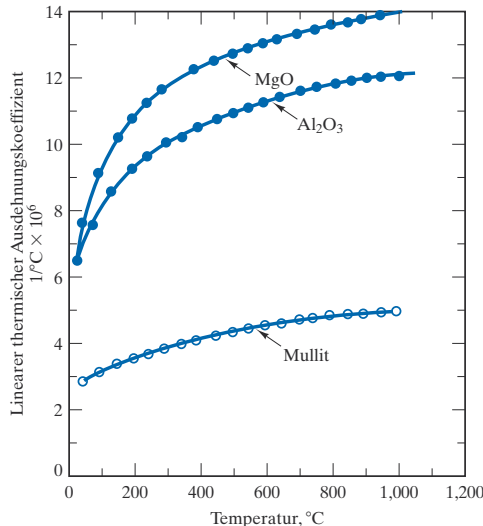


Abbildung 7.3: Linearer thermischer Ausdehnungskoeffizient als Funktion der Temperatur für drei Keramikoxide (Mullite =  $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ )

Wie in *Kapitel 12* noch erläutert wird, bilden Kristallite von  $\beta$ -Eucryptit einen wichtigen Teil der Mikrostruktur bestimmter Glas-Keramiken. Das  $\beta$ -Eucryptit ( $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) hat einen *negativen* Wärmeausdehnungskoeffizienten, wodurch der Werkstoff insgesamt einen niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten erhält und demzufolge eine ausgezeichnete Widerstandsfähigkeit gegen Temperaturschock aufweist – ein

Problem, dem sich Abschnitt 7.4 widmet. In außergewöhnlichen Fällen, wie z.B.  $\beta$ -Eucryptit, „entspannt“ sich die Gesamtomarchitektur bei steigender Temperatur wie eine Ziehharmonika.

**Beispiel 7.2**

Ein Röhrenofen aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit der Länge 0,1 m wird von Raumtemperatur (25 °C) auf 1.000 °C aufgeheizt. Berechnen Sie den Längenzuwachs infolge dieser Erwärmung unter der Annahme, dass die Röhre mechanisch nicht behindert wird.

**Lösung**

Durch Umstellen der Gleichung 7.4 erhält man

$$dL = \alpha L dT.$$

Wir können von linearer Wärmeausdehnung ausgehen und mit dem Gesamtwärmeausdehnungskoeffizienten für diesen Temperaturbereich entsprechend Tabelle 7.2 rechnen. Somit ergibt sich:

$$\begin{aligned} \Delta L &= \alpha L_0 \Delta T \\ &= [8,8 \times 10^{-6} \text{ mm}/(\text{mm} \cdot ^\circ\text{C})](0,1 \text{ m})(1.000 - 25)^\circ\text{C} \\ &= 0,858 \times 10^{-3} \text{ m} \\ &= 0,858 \text{ mm}. \end{aligned}$$

**Übung 7.2**

Ein Röhrenofen aus Mullit mit der Länge 0,1 m wird von Raumtemperatur (25 °C) auf 1.000 °C aufgeheizt. Berechnen Sie den Längenzuwachs infolge dieser Erwärmung unter der Annahme, dass die Röhre mechanisch nicht behindert wird (siehe Beispiel 7.2).

## 7.3 Wärmeleitfähigkeit

Die Gesetze für die Wärmeleitung in Festkörpern sind analog denen für die Diffusion (siehe *Abschnitt 5.3*). Die Entsprechung des Diffusionskoeffizienten  $D$  ist die **Wärmeleitfähigkeit**  $k$ , die durch das **Fouriersche<sup>1</sup> Gesetz**

$$k = - \frac{dQ/dt}{A(dT/dx)} \quad (7.5)$$

<sup>1</sup> Jean Baptiste Joseph Fourier (1768–1830), französischer Mathematiker, brachte uns einige der nützlichsten Konzepte in der angewandten Mathematik. Seine Demonstration, dass sich komplizierte Wellenformen durch eine Reihe von trigonometrischen Funktionen beschreiben lassen, brachte ihm seinen ersten großen Ruhm und den Titel „Baron“ (von Napoleon verliehen) ein. Im Jahre 1822 veröffentlichte er sein Hauptwerk zur Wärmeleitung unter dem Titel *Analytical Theory of Heat*.

definiert ist. Hierbei bezeichnet  $dQ/dt$  die Geschwindigkeit des Wärmeübergangs über einer Fläche  $A$  infolge eines Temperaturgradienten  $dT/dx$ . Abbildung 7.4 veranschaulicht die verschiedenen Terme von Gleichung 7.5. Vergleichen Sie diese Abbildung mit der Darstellung für das Ficksche Gesetz in *Abbildung 5.9*. Die Einheit für  $k$  ist  $J/(s \cdot m \cdot K)$ . Für stationäre Wärmeleitung durch eine flache Platte werden die Differentiale in Gleichung 7.5 zu Durchschnittstermen:

$$k = - \frac{\Delta Q / \Delta t}{A(\Delta T / \Delta x)}. \quad (7.6)$$

Mit Gleichung 7.6 lässt sich der Wärmefluss durch feuerfeste Wände in Hochtemperaturöfen beschreiben.

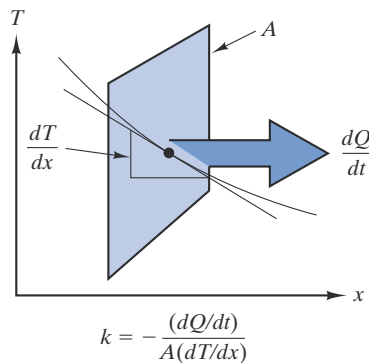


Abbildung 7.4: Der Wärmeübergang ist durch das Fouriersche Gesetz (Gleichung 7.5) definiert.

Tabelle 7.4 zeigt Werte für die Wärmeleitfähigkeit. Wie der Wärmeausdehnungskoeffizient ist die Wärmeleitfähigkeit eine Funktion der Temperatur. Abbildung 7.5 stellt den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit für gebräuchliche Keramiken über einem breiten Temperaturbereich dar.

Tabelle 7.4

### Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Werkstoffe

Werkstoff	k [J/(s · m · K)] Temperatur =			
	27 °C (300 K)	100 °C	527 °C (800 K)	1.000 °C
<b>Metalle</b>				
Aluminium	237		220	
Kupfer	398		371	
Gold	315		292	
Eisen	80		43	
Nickel	91		67	
Silber	427		389	
Titan	22		20	
Wolfram	178		128	

### Wärmeleitfähigkeit für verschiedene Werkstoffe

Werkstoff	k [J/(s · m · K)] Temperatur =			
	27 °C (300 K)	100 °C	527 °C (800 K)	1.000 °C
<b>Keramiken und Gläser</b>				
Mullite (3Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · 2SiO <sub>2</sub> )		5,9		3,8
Porzellan		1,7		1,9
Schamotte		1,1		1,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		30,0		6,3
Spinell (MgO · Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )		15,0		5,9
MgO		38,0		7,1
ZrO <sub>2</sub> (stabilisiert)		2,0		2,3
TiC		25,0		5,9
Silikatglas		2,0		2,5
Kalknatronsilikatglas		1,7		–
<b>Polymere</b>				
Nylon 66	2,9			
phenolische Stoffe	0,17-0,52			
Polyethylen (hohe Dichte)	0,33			
Polypropylen	2,1-2,4			
Polytetrafluorethylen (PTFE)	0,24			

Die Wärmeleitung in technischen Werkstoffen geschieht durch Atomschwingungen und die Leitung von freien Elektronen. Bei schlechten elektrischen Leitern, wie z.B. Keramiken und Polymeren, wird die Wärmeenergie hauptsächlich durch die Schwingungen von Atomen transportiert. Bei elektrisch leitenden Metallen kann die kinetische Energie der leitenden (oder „freien“) Elektronen beträchtlich mehr zur Wärmeleitung beitragen als die Atomschwingungen.

*Kapitel 15* geht detaillierter auf den Mechanismus der elektrischen Leitung ein. Allgemein ist dieser Mechanismus dadurch gekennzeichnet, dass sich das Elektron sowohl als Welle als auch als Teilchen betrachten lässt. Jede strukturelle Unordnung stört die Bewegung der Wellenform. Da die Schwingungen des Kristallgitters bei steigender Temperatur zunehmen, verringert sich im Allgemeinen die Wärmeleitfähigkeit. Analog führt die von chemischen Verunreinigungen hervorgerufene strukturelle Unordnung zu einer ähnlichen Abnahme der Wärmeleitfähigkeit. Letztlich haben Metalllegierungen geringere Wärmeleitfähigkeiten als reine Metalle.



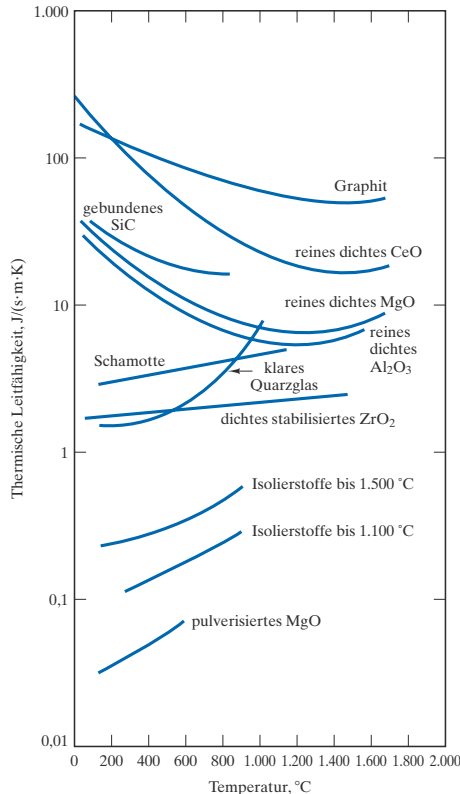


Abbildung 7.5: Wärmeleitfähigkeit verschiedener Keramiken über einem Temperaturbereich

Bei Keramiken und Polymeren sind hauptsächlich die Atomschwingungen für die Wärmeleitfähigkeit verantwortlich, da es kaum leitende Elektronen gibt. Allerdings haben diese Gitterschwingungen ebenfalls Wellencharakter und werden in ähnlicher Weise durch strukturelle Unordnung behindert. Im Ergebnis haben Gläser eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit als kristalline Keramiken der gleichen chemischen Zusammensetzung. Ebenso weisen amorphe Polymere eine geringere Leitfähigkeit als kristalline Polymere vergleichbarer Zusammensetzungen auf. Zudem fällt die Wärmeleitfähigkeit von Keramiken und Polymeren mit steigender Temperatur, weil die stärker schwingenden Atome eine zunehmende Unordnung bewirken. Bei manchen Keramiken beginnt die Leitfähigkeit schließlich mit weiterer Temperaturzunahme infolge Wärmeübertragung durch Strahlung zu steigen. Optisch transparente Keramiken können beträchtliche Anteile von Infrarotstrahlung übertragen. Mit diesen Themen beschäftigt sich *Kapitel 16* ausführlich.

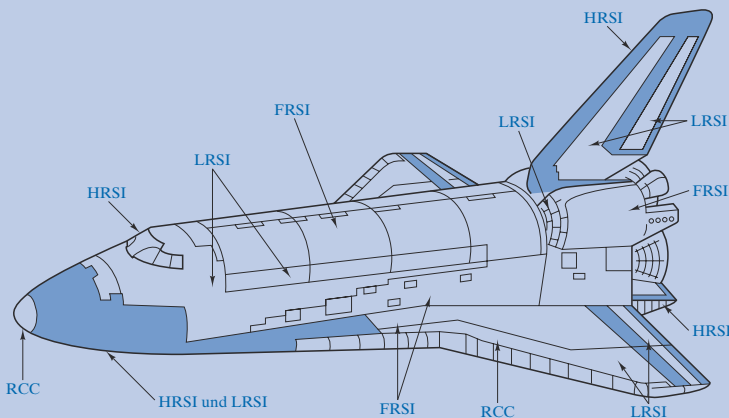
Die Wärmeleitfähigkeit von Keramiken und Polymeren geht durch Porosität weiter zurück. Das Gas in den Poren hat eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit, was der Mikrostruktur als Ganzes eine niedrige Nettoleitfähigkeit verleiht. Herausragende Beispiele sind die hochentwickelten Kacheln des Spaceshuttles (siehe den folgenden Kasten „Die Welt der Werkstoffe“) und die einfachen Trinkbecher aus Schaumpolystyrol (Styropor).

## Die Welt der Werkstoffe

### Wärmeschutzsysteme für den Spaceshuttle

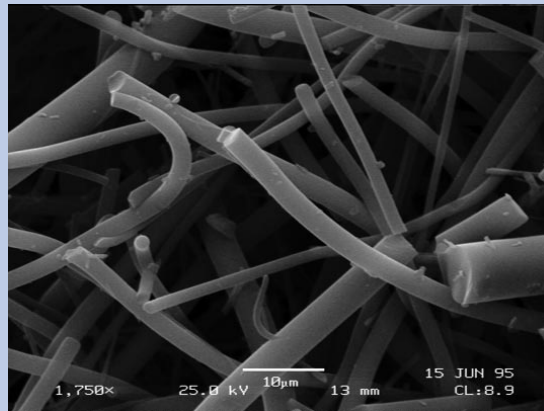
Das als Spaceshuttle bekannte Raumtransportersystem der NASA<sup>a</sup> stellt außerordentlich hohe Anforderungen an die thermische Isolierung. Der Spaceshuttle wird mit einer Rakete gestartet und ist ein wieder verwendbares Raumfahrzeug, das für verschiedenste Nutzlasten und Aufgaben konzipiert ist – beispielsweise um wissenschaftliche Experimente durchzuführen oder kommerzielle Satelliten auszusetzen. Am Ende einer Mission im Orbit tritt das Raumfahrzeug wieder in die Atmosphäre ein und unterliegt dadurch außerordentlicher Aufheizung durch Reibung. Schließlich landet der Spaceshuttle ähnlich wie ein normales Flugzeug.

Die erfolgreiche Entwicklung einer vollständig wieder verwendbaren äußeren Haut, die als Wärmeschutzsystem dient, war entscheidend für den Spaceshuttle-Gesamtentwurf. Die bisher in der Flugzeugindustrie eingesetzten Hochleistungs-isolierwerkstoffe erwiesen sich als ungeeignet für die Entwurfsspezifikationen des Spaceshuttles, weil sie entweder nicht wieder verwendbar oder zu dicht waren. Außerdem muss das System eine aerodynamisch glatte äußere Oberfläche bieten, harten thermomechanischen Belastungen standhalten und Feuchtigkeit sowie anderen atmosphärischen Verunreinigungen widerstehen. Schließlich ist das Wärmeschutzsystem mit der Flugzeugzelle aus einer Aluminiumlegierung zu verbinden.



*Schematische Darstellung der Komponentenverteilung des Wärmeschutzsystems für den Spaceshuttle: FRSI (Felt Reusable Surface Insulation – Oberflächenisolierung aus wieder verwendbarem Filz), LRSI (Low-Temperature Reusable Surface Insulation – wieder verwendbare Oberflächenisolierung für niedrige Temperaturen), HRSI (High-Temperature Reusable Surface Insulation – wieder verwendbare Oberflächenisolierung für hohe Temperaturen) und RCC (Reinforced Carbon-Carbon Composite – faserverstärkter Kohlenstoff-Verbundwerkstoff)*

Wie die Abbildung zeigt, realisiert man die geeignete Wärmeisolation durch viele spezielle Werkstoffe, je nach der lokal auftretenden höchsten Oberflächentemperatur. Ungefähr 70% der Spaceshuttle-Oberfläche sind gegen Temperaturen zwischen 400 °C und 1.260 °C zu schützen. Für diesen Hauptteil des Wärmeschutzsystems werden Keramikkacheln eingesetzt. Im Bereich von 400 °C bis 650 °C besteht die wieder verwendbare Oberflächenisolation (LRSI) aus hochreinen Quarzfasern mit einem Durchmesser zwischen 1 und 4  $\mu\text{m}$  und Faserlängen von etwa 3.000  $\mu\text{m}$ . Lockere gepackte Fasern werden gesintert und ergeben ein stark poröses und leichtgewichtiges Material, wie es die folgende Mikroaufnahme zeigt.



*Eine Rastermikroskopaufnahme der gesinterten Quarzfasern in einer Keramikachel des Spaceshuttles*

Keramik- und Glaswerkstoffe sind von Natur aus gute Wärmeisolatoren und zusammen mit der äußerst hohen Porosität (ungefähr 93% Volumenanteil) der sich daraus ergebenden Mikrostruktur erhält man außergewöhnlich niedrige Werte der Wärmeleitfähigkeit. Wir bezeichnen diese Kacheln als *keramisch*, auch wenn ihre zentrale Komponente im Allgemeinen ein Glas (Quarzglas) ist. Das hängt damit zusammen, dass man Gläser oftmals als Untermenge von Keramiken ansieht und manche Kacheln aus Aluminoborosilikat-Fasern bestehen, die durch Entglasen zu echten kristallinen Keramiken werden können.

<sup>a</sup> NASA (National Aeronautics and Space Administration, Nationale Luft- und Raumfahrtbehörde der USA)

**Beispiel 7.3**

Berechnen Sie die stationäre Wärmeübergangsgeschwindigkeit (in  $\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ ) durch eine Kupferplatte von 10 mm Dicke, wenn über der Platte ein Temperaturabfall von  $50^\circ\text{C}$  (von  $50^\circ\text{C}$  auf  $0^\circ\text{C}$ ) auftritt.

**Lösung**

Durch das Umstellen von Gleichung 7.6 ergibt sich

$$(\Delta Q / \Delta t) / A = -k(\Delta T / \Delta x).$$

Über diesem Temperaturbereich (Durchschnittstemperatur  $T = 25^\circ\text{C} = 298\text{K}$ ) können wir die Wärmeleitfähigkeit für Kupfer bei 300 K aus Tabelle 7.4 verwenden und erhalten

$$\begin{aligned} (\Delta Q / \Delta t) / A &= -(398 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}) \left( [0^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}] / [10 \times 10^{-3} \text{ m}] \right) \\ &= -(398 \text{ J/s} \cdot \text{m} \cdot \text{K}) (-5 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C/m}). \end{aligned}$$

Unter der Voraussetzung, dass wir mit inkrementellen Temperaturänderungen rechnen, lassen sich die Einheiten K und  $^\circ\text{C}$  kürzen und das Ergebnis lautet:

$$(\Delta Q / \Delta t) / A = 1,99 \times 10^6 \text{ J/m}^2 \cdot \text{s}.$$

**Übung 7.3**

Berechnen Sie die stationäre Wärmeübergangsgeschwindigkeit durch eine Kupferplatte von 10 mm Dicke bei einem Temperaturabfall um  $50^\circ\text{C}$  von  $550^\circ\text{C}$  auf  $500^\circ\text{C}$  (siehe Beispiel 7.3).

## 7.4 Thermoschock

Setzt man bestimmte Werkstoffe, wie z.B. Keramiken und Gläser, die von Natur aus spröde sind, bei hohen Temperaturen ein, führt das zu einem speziellen technischen Problem, dem **Thermoschock**. Dieser lässt sich definieren als (teilweiser oder vollständiger) Bruch des Werkstoffs als Ergebnis einer Temperaturänderung (vor allem einer plötzlichen Abkühlung).

Bei einem Thermoschock können sowohl Wärmeausdehnung als auch Wärmeleitfähigkeit eine Rolle spielen. Ausgehend von diesen Eigenschaften kann es auf zwei Wegen zum Thermoschock kommen: Erstens kann sich durch Behinderung einer gleichmäßigen Ausdehnung eine Ausfallspannung aufbauen. Zweitens produzieren schnelle Temperaturänderungen temporäre Temperaturgradienten im Werkstoff, woraus ein interner Spannungsaufbau resultiert. Abbildung 7.6 veranschaulicht den ersten Fall. Das gleiche Ergebnis entsteht, wenn man die ungehinderte Ausdehnung zulässt und anschließend mechanischen Druck auf den Stab ausübt, um ihn auf die



## Copyright

Daten, Texte, Design und Grafiken dieses eBooks, sowie die eventuell angebotenen eBook-Zusatzdaten sind urheberrechtlich geschützt. Dieses eBook stellen wir lediglich als persönliche Einzelplatz-Lizenz zur Verfügung!

Jede andere Verwendung dieses eBooks oder zugehöriger Materialien und Informationen, einschliesslich

- der Reproduktion,
- der Weitergabe,
- des Weitervertriebs,
- der Platzierung im Internet, in Intranets, in Extranets,
- der Veränderung,
- des Weiterverkaufs
- und der Veröffentlichung

bedarf der schriftlichen Genehmigung des Verlags.

Insbesondere ist die Entfernung oder Änderung des vom Verlag vergebenen Passwortschutzes ausdrücklich untersagt!

Bei Fragen zu diesem Thema wenden Sie sich bitte an: [info@pearson.de](mailto:info@pearson.de)

## Zusatzdaten

Möglicherweise liegt dem gedruckten Buch eine CD-ROM mit Zusatzdaten bei. Die Zurverfügungstellung dieser Daten auf unseren Websites ist eine freiwillige Leistung des Verlags. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen.

## Hinweis

Dieses und viele weitere eBooks können Sie rund um die Uhr und legal auf unserer Website



herunterladen