



Burkhard Heine  
Werkstoffwahl für technische Anwendungen



Burkhard Heine

# Werkstoffwahl für technische Anwendungen

Grundlagen und Beispiele

mit 170 Bildern



Fachbuchverlag Leipzig  
im Carl Hanser Verlag

Prof. Dr. rer. nat. Burkhard Heine

Hochschule Aalen für Technik und Wirtschaft  
Fakultät Maschinenbau/Werkstofftechnik  
burkhard.heine@hs-aalen.de



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN 978-3-446-44667-0  
E-Book-ISBN 978-3-446-44715-8

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.  
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2016 Carl Hanser Verlag München  
[www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)  
Lektorat: Ute Eckardt  
Herstellung: Katrin Wulst  
Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell  
Coverrealisierung: Stephan Rönigk  
Druck und Bindung: Hubert & Co, Göttingen

Printed in Germany

# Vorwort

Die Frage, nach welchen Prinzipien zielführende Werkstoffe für maschinenbauliche Komponenten gefunden werden können, beschäftigt die Ingenieure zu allen Zeiten. Anliegen dieses Buchs ist das Aufzeigen eines analytischen Wegs von der Bauteilbeanspruchung zur Werkstoffwahl.

Zunächst werden die werkstoffkundlichen Hintergründe der Wärmeleitfähigkeit, der Temperaturleitfähigkeit, der Dichte, des Elastizitätsmoduls, der Versagensspannung, der Bruchzähigkeit, des Verlustfaktors und des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten dargestellt. Anschließend wird anhand häufig vorkommender Beispiele die werkstoffkundliche Auslegung anrissfreier wie auch angerissener Bauteile behandelt. Dies erfolgt in der Regel vor dem Hintergrund einer Gewichtsoptimierung. Geometrisch komplex gestaltete Bauteile werden dazu in einfachere Substrukturen zerlegt und die Beanspruchungen ermittelt, die an den Schnittstellen in jede einzelne Substruktur eingeleitet werden. Dadurch ergeben sich übersichtlichere Beanspruchungsfälle, die Auslegungsaussagen mit erträglichem mathematischem Aufwand möglich machen. Bei den anrissfreien und angerissenen Bauteilen werden als Strukturen, die im Maschinenbau häufig anzutreffen sind, innenbedruckte Rohre sowie unter Zugspannung, Druckspannung, Biegung oder Torsionsbeanspruchung stehende Stäbe, Platten, Balken und Kragarme behandelt. Bei angerissenen Bauteilen werden weiterhin Fälle dargestellt, bei denen die Risslänge durch zerstörungsfreie Bauteilprüfung ermittelt werden konnte. Weitere Beispiele zeigen komplexe Fragestellungen, bei denen Risse in Bauteilen wegen der immer gegebenen Auflösungsgrenze der zerstörungsfreien Bauteilprüfung nicht mehr erkannt, deswegen aber nicht zwingend ausgeschlossen werden können. Hierbei können oft die Bauteile wegen ihrer Größe unter wirtschaftlichen Aspekten nicht zerstörungsfrei auf Rissfreiheit geprüft werden. Darüber hinaus wird die werkstoffkundliche Auslegung von Bauteilen vorgenommen, die Wärme speichern bzw. Schutz vor Wärme bieten sollen. Daneben kommt die werkstoffkundliche Auslegung von Bauteilen zur Sprache, die kinetische Energie speichern bzw. vernichten sollen oder Thermoschockbeständigkeit aufweisen sollen. Gleichfalls behandelt werden Lager- und Dichtungsfragestellungen.

Das Buch richtet sich an Studierende der Werkstofftechnik, des Maschinenbaus und der Fertigungstechnik sowie an Ingenieure in der Industrie. Ausgewählte Kapitel bieten sich für eine Einführung in die Werkstoffkunde an, führen sie doch die Vielfalt der zur Verfügung stehenden Werkstoffe und die Notwendigkeit des Erwerbs von Wissen um die Hintergründe der Werkstoffeigenschaften vor Augen. Daneben ist das Buch auch als Einführung in die Festigkeits- und Konstruktionslehre geeignet, denn es zeigt Möglichkeiten auf, wie der „rote Faden“ zwischen der Werkstoffkunde auf der einen und der Festigkeits- und Konstruktionslehre auf der anderen Seite geknüpft werden kann. Ausgehend von den konstruktiven Gegebenheiten kann anhand eines Forderungskatalogs für das jeweilige Bauteil eine Werkstoffvorauswahl in Gestalt zielführender Werkstofffamilien getroffen werden.

Ich bedanke mich beim Carl Hanser Verlag, der das Buch in einer ansprechenden Gestaltung anbieten kann. Mein besonderer Dank gilt Frau *Ute Eckardt* und Frau *Katrin Wulst*, die durch die Durchsicht des Manuskripts und die Hilfestellung bei der Gestaltung der Bilder viel zum Gelingen des Buchs beigetragen haben.

Aalen, im August 2015

Burkhard Heine

# Inhalt

<b>■</b>	<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>■</b>	<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b> .....	<b>10</b>
<b>1</b>	<b>Vorbemerkungen</b> .....	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b> .....	<b>19</b>
	2.1 Wärmeleitfähigkeit - Temperaturleitfähigkeit .....	19
	2.1.1 Wärmeleitfähigkeit .....	19
	2.1.2 Temperaturleitfähigkeit .....	22
	2.2 Dichte .....	25
	2.3 Elastizitätsmodul .....	26
	2.4 Versagensspannung .....	29
	2.5 Bruchzähigkeit .....	37
	2.6 Verlustfaktor .....	55
	2.7 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient .....	61
<b>3</b>	<b>Beispiele</b> .....	<b>64</b>
	3.1 Thermophysikalisches Verhalten .....	64
	3.1.1 Platte als Wärmespeicher .....	64
	3.1.2 Platte als Wärmeschutz .....	66
	3.2 Elastisches Verhalten - Schallgeschwindigkeit .....	68
	3.3 Definierte elastische Verformung bei definierter Masse .....	70
	3.3.1 Rohr unter Innendruck .....	70
	3.3.2 Stab unter Zugbeanspruchung .....	74
	3.3.3 Unterkritisch gestauchte Platte .....	76
	3.3.4 Unterkritisch gestauchter Stab .....	79
	3.3.5 Überkritisch gestauchte Platte .....	81
	3.3.6 Überkritisch gestauchter Stab .....	84
	3.3.7 Stab unter Torsion .....	86
	3.3.8 Balken quadratischen Querschnitts unter Biegung .....	89
	3.3.9 Balken kreisförmigen Querschnitts unter Biegung .....	91
	3.3.10 Platte unter Biegung .....	93



3.3.11	Kragarm unter Biegung	96
3.3.12	Kreisscheibe unter Druckdifferenz	98
3.3.13	Kreisscheibe unter Eigengewicht	101
3.3.14	Balken quadratischen Querschnitts unter Eigengewicht	104
3.3.15	Balken kreisförmigen Querschnitts unter Eigengewicht	106
3.3.16	Platte unter Eigengewicht	108
3.3.17	Kragarm unter Eigengewicht	111
3.4	Ausnutzung der Versagensspannung bei definierter Masse	113
3.4.1	Rohr unter Innendruck	113
3.4.2	Stab unter Zugbeanspruchung	116
3.4.3	Unterkritisch gestauchte Platte	118
3.4.4	Unterkritisch gestauchter Stab	121
3.4.5	Stab unter Torsion	124
3.4.6	Balken quadratischen Querschnitts unter Biegung	127
3.4.7	Balken kreisförmigen Querschnitts unter Biegung	129
3.4.8	Platte unter Biegung	132
3.4.9	Kragarm unter Biegung	134
3.4.10	Balken quadratischen Querschnitts unter Eigengewicht	137
3.4.11	Balken kreisförmigen Querschnitts unter Eigengewicht	139
3.4.12	Platte unter Eigengewicht	142
3.4.13	Kragarm unter Eigengewicht	145
3.5	Ausnutzung der Versagensspannung bei definierter elastischer Verformung	147
3.5.1	Kreisscheibe unter Druckdifferenz	147
3.5.2	Wälzlager	150
3.5.3	Quetschdichtung	153
3.5.4	Elastisches Gelenk	155
3.6	Ausnutzung der elastischen Verformung bei Riss bekannter Länge - Stab unter Zugbeanspruchung	159
3.7	Ausnutzung der Versagensspannung bei definierter Masse und bei Riss bekannter Länge	162
3.7.1	Rohr unter Innendruck	162
3.7.2	Stab unter Zugbeanspruchung	164
3.7.3	Platte unter Zugbeanspruchung	167
3.7.4	Stab unter Torsion	170
3.7.5	Platte unter Biegung	173
3.7.6	Balken quadratischen Querschnitts unter Biegung	177
3.7.7	Balken kreisförmigen Querschnitts unter Biegung	180
3.7.8	Kragarm unter Biegung	183
3.7.9	Balken quadratischen Querschnitts unter Eigengewicht	185
3.7.10	Balken kreisförmigen Querschnitts unter Eigengewicht	188
3.7.11	Platte unter Eigengewicht	191
3.7.12	Kragarm unter Eigengewicht	194
3.8	Ausnutzung der Versagensspannung bei zerstörungsfrei nachgewiesener „Rissfreiheit“ - Kugelbehälter unter Innendruck	197
3.9	Ausnutzung der Versagensspannung bei zerstörungsfrei nicht nachweisbarer „Rissfreiheit“ - Kugelbehälter unter Innendruck	201

3.10	Speicherung von Energie .....	205
3.10.1	Definierte elastische Verformungsenergie pro Volumeneinheit (Feder) .....	205
3.10.2	Definierte kinetische Energie pro Volumeneinheit (Schwungrad) .....	208
3.10.3	Definierte kinetische Energie pro Masseneinheit unter Ausnutzung der Versagensspannung (Schwungrad) .....	210
3.10.4	Maximale elastische Verformungsenergie pro Volumeneinheit bei Riss bekannter Länge (Feder) .....	213
3.11	Energieverlust – Definierte kinetische Energie pro Volumeneinheit (Feder) .....	215
3.12	Thermomechanisches Verhalten .....	218
3.12.1	Thermisch induzierte Dehnung .....	218
3.12.2	Thermoschockbeständigkeit .....	220

**Quellen und weiterführende Literatur .....** **227**

**Index .....** **229**

# Formelzeichen und Abkürzungen

$\alpha$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$a$	Temperaturleitfähigkeit
$A$	Querschnittsfläche
$\beta$	Schiebewinkel
$b$	Krümmungsradius der Rissspitze
$B$	Bauteilbreite
$c$	Wärmekapazität
$C, C^*, C^{**}$	Konstante
$D$	Federsteifigkeit
$d$	Durchmesser
$d_0$	Atomdurchmesser
$E$	Elastizitätsmodul
$E_i$	Eigenschaften
$\varepsilon$	Dehnung
$\varepsilon_{\max,0}$	Elongation
$\varepsilon_v$	Dehnung bei Bauteilversagen
$F$	Kraft
$f$	Elastisch zurückgelegter Weg
$G$	Schubmodul
$\gamma$	Spezifische Oberflächenenergie
$g$	Erdbeschleunigung
$G_1$	Energiefreisetzungsrate
$G_{1c}$	Kritische Energiefreisetzungsrate
$h$	Rissöffnung
$\eta$	Verlustfaktor
$H$	Bauteilhöhe

---

$HBW$	Brinellhärte
$I$	Flächenträgheitsmoment
$I_p$	Polares Flächenträgheitsmoment
$J$	Massenträgheitsmoment
$\varphi$	Verdrehwinkel
$K$	Kompressionsmodul
$K_I$	Spannungsintensitätsfaktor
$K_{Ic}$	Bruchzähigkeit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$A$	Logarithmisches Dekrement
$L$	Bauteillänge
$m$	Masse
$M_b$	Biegemoment
$M_t$	Torsionsmoment
$\nu$	Poissonzahl
$n$	Frequenz
$p$	Druck
$Q$	Wärmemenge
$q$	Wärmefluss
$\rho$	Dichte
$R$	Entfernung von der Rissspitze
$R_{pl}$	Erstreckung der plastischen Zone vor der Rissspitze
$r$	Radius
$R_{Bi}$	Randbedingung
$R_L$	Risslänge
$R_{p0,2}$	0,2%-Dehngrenze
$R_{p1,0}$	1,0%-Dehngrenze
$\sigma$	Zugspannung
$\sigma_{bmax}$	Maximale Randfaserspannung
$\sigma_D$	Dauer-Versagensspannung
$\sigma_{krit}$	Kritische Zugspannung

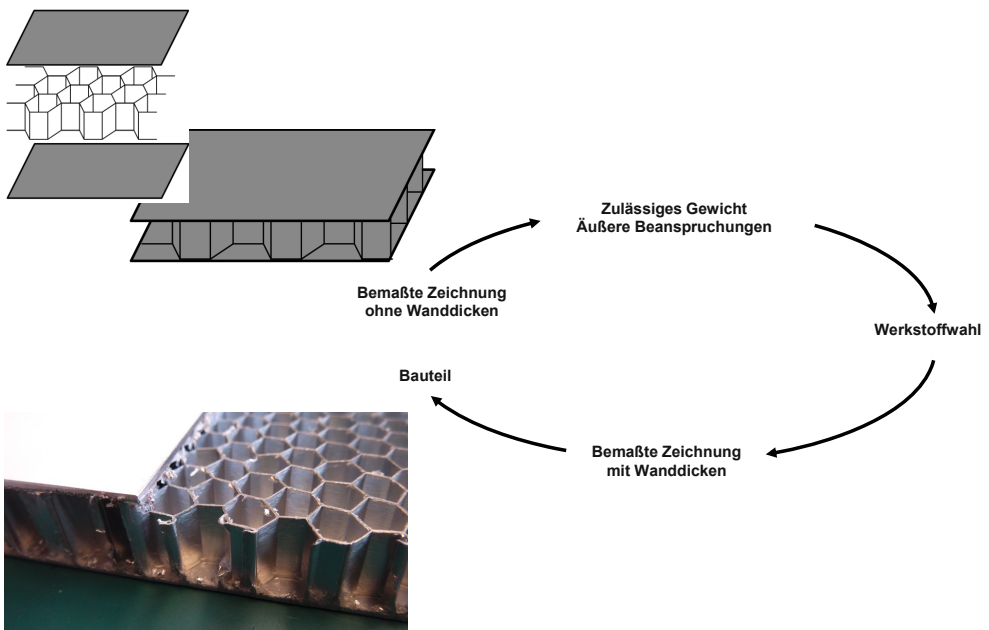
$\sigma_{\max,0}$	Ausgangsspannung
$\sigma_{t(\text{therm})}$	Thermisch induzierte Spannung
$\sigma_{t(\text{therm})v}$	Thermisch induzierte Versagensspannung
$\sigma_v$	Versagensspannung
$\sigma_{v,\text{theor}}$	Theoretische Versagensspannung
$\sigma_{vb}$	Versagensspannung im Biegeversuch
$\sigma_{vd}$	Versagensspannung im Druckversuch
$\sigma_{vz}$	Versagensspannung im Zugversuch
$\sigma_y$	Zugspannung vor der Rissspitze
$s$	Ortskoordinate
$t$	Zeit
$T$	Temperatur
$T_s$	Schmelzpunkt
$\tau$	Schubspannung
$U$	Umfang
$V$	Volumen
$v_L$	Longitudinalwellengeschwindigkeit
$\omega$	Winkelgeschwindigkeit
$W$	Energie
$w$	Scherweg
$WD$	Wanddicke
$W_{eV}$	Elastische Verformungsenergie
$WF_i$	Werkstofffamilie
$WL$	Wellenlänge
$W_m$	Energie pro Masseneinheit
$W_{\max,0}$	Ausgangsenergie
$W_0$	Oberflächenenergie
$W_v$	Energie pro Volumeneinheit

# 1

## Vorbemerkungen

Die Konzeption eines Bauteils beginnt in der Regel mit einer Zeichnung, die bis auf die Wanddicken alle Abmessungen enthält. Dem schließt sich die Analyse der Beanspruchungen des Bauteils an. Als stets vorhandene Beanspruchung des Bauteils ist dessen **Gewichtskraft** zu nennen. Ist sie wesentlich geringer als die außen angreifenden Kräfte, so wird sie oft vernachlässigt und es werden als Beanspruchungen nur die außen angreifenden Kräfte berücksichtigt. Kommen bei der Konzeption des Bauteils jedoch **Leichtbauaspekte** zum Tragen, so ist zusätzlich der Gewichtskraft Aufmerksamkeit zu schenken. Als weitere Beanspruchung kann ein Wärmefeld hinzukommen, das die Temperatur des Bauteils bestimmt.

Ein entscheidender Schritt, der sich der Analyse der Beanspruchungen des Bauteils anschließt, ist die Wahl eines zweckdienlichen Werkstoffs. Dieser Schritt ist entscheidend, denn erst er kann die **Wanddicke** vor dem Hintergrund der zuvor genannten Beanspruchungen festschreiben (Bild 1.1).

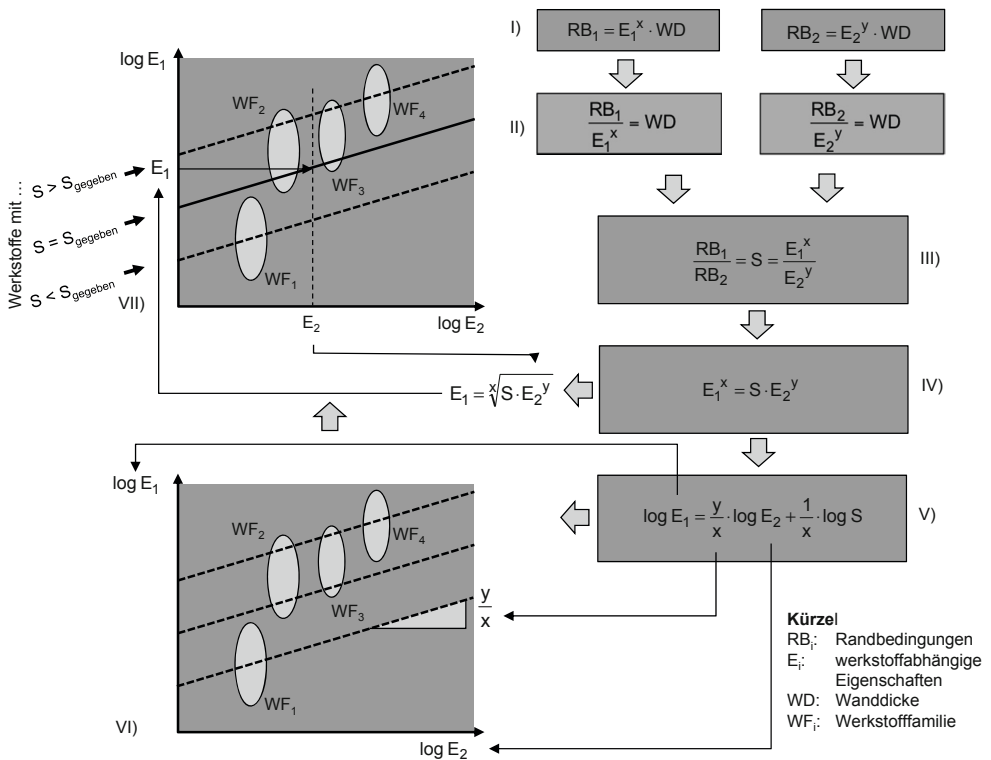


**Bild 1.1** Vom Konzept zum Bauteil



Mit seinen konkreten Bauteilbeanspruchungen steht der Entscheidungsträger in der Verpflichtung, einen zielführenden Werkstoff auszusuchen, oftmals mehr oder weniger ratlos vor der großen Vielfalt an zur Verfügung stehenden Werkstoffen. – Welche Werkstoffe für den Entscheidungsträger überhaupt in Frage kommen, erfahren wird gleich! Zur Verfolgung eines analytischen Wegs von der **Bauteilbeanspruchung** zur Werkstoffwahl werden geometrisch komplex gestaltete Bauteile gedanklich in einfachere **Substrukturen** zerlegt und die Beanspruchungen ermittelt, die an den Schnittstellen in jede einzelne Substruktur eingeleitet werden. Dadurch ergeben sich übersichtlichere Beanspruchungsfälle, die Auslegungsaussagen mit erträglichem mathematischem Aufwand möglich machen. Im Beispielteil dieses Buchs werden häufig vorkommende Beanspruchungsfälle vorgestellt (Bild 1.2).

Sie werden nach einem von *M.F.Ashby* (Cambridge University) entwickelten Prinzip analysiert (Bild 1.3), was die zielgerichtete Werkstoffwahl möglich macht. Hierbei werden physikalische Zusammenhänge zwischen den Randbedingungen ( $RB_i$ ) Gewichtskraft und äußere Beanspruchungen auf der einen und der Wanddicke ( $WD$ ) des Bauteils auf der anderen Seite aufgestellt. Als verknüpfende Größen sind Eigenschaften ( $E_i$ ) auszumachen, die alle werkstoffabhängig sind (Schritt I). Hierzu zählen als thermophysikalische Eigenschaften die **Dichte**, die **Wärmeleitfähigkeit**, die **Temperaturleitfähigkeit** und der **Wärmeausdehnungskoeffizient** und als mechanische Eigenschaften der **Elastizitätsmodul**, die **Versagensspannung**, die **Bruchzähigkeit** und der **Verlustkoeffizient**.



**Bild 1.3** Prinzip der Werkstoffwahl



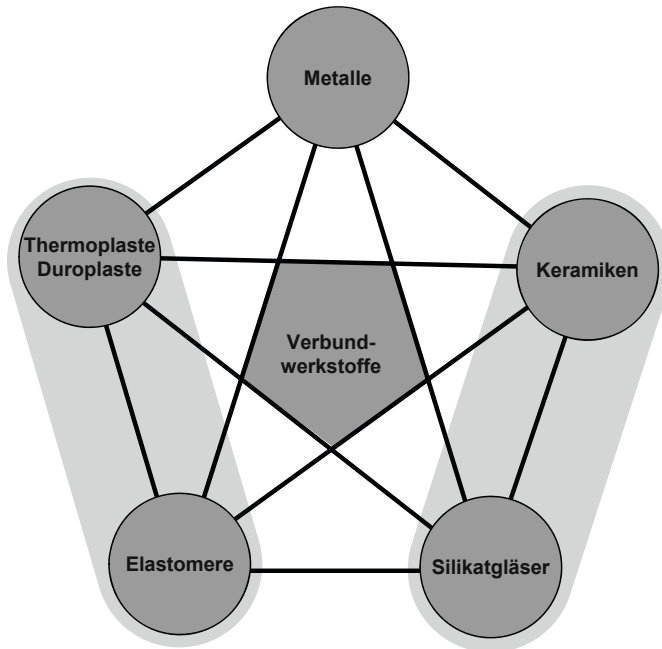
Nach dem Auflösen der Beziehungen aus Schritt I nach WD (Schritt II) und Gleichsetzen der entstehenden Terme können die Randbedingungen  $RB_1$  und die Eigenschaften  $E_1$  durch Äquivalenzumformungen jeweils zusammengefasst und mit der Größe S beschrieben werden (Schritt III). Anschließend wird der rechte Teil der Gleichung, die sich in Schritt III ergibt und nur Eigenschaften  $E_1$  enthält, entsprechend Schritt IV umgeformt und nach dem Logarithmieren auf die in Schritt V dargestellte Form gebracht. Die nun vorliegende Beziehung führt in einer  $\log E_1$ - $\log E_2$ -Graphik zu einer Geradenschar mit einer Steigung, die sich aus den Exponenten  $x$  und  $y$  der Eigenschaften zu  $y/x$  berechnet. In die  $\log E_1$ - $\log E_2$ -Graphik sind in sich geschlossene Linienzüge eingetragen, innerhalb derer die  $E_1$ - $E_2$ -Konfigurationen von Werkstoffen liegen, die wegen ihrer Eigenschaftsähnlichkeit zu einer **Werkstofffamilie**  $WF_1$  zusammengefasst werden.

Jeweils eine eigene **Werkstofffamilie** bilden z.B. Aluminiumlegierungen, Stähle, Oxide, Nitride, Thermoplaste, Gläser, etc. Die zur Verfügung stehenden Werkstofffamilien werden unter Ausschluss der **Verbundwerkstoffe** nachfolgend detailliert vorgestellt (hier ergibt sich angesichts der Gesetze der Kombinatorik eine nahezu unüberschaubare Vielfalt an Verbundwerkstoffen, bei denen auch noch die geometrische Anordnung der miteinander verbundenen Werkstoffe eigenschaftsbeeinflussend ist).

Zu beachten ist, dass nicht zwangsläufig jede  $E_1$ - $E_2$ -Konfiguration innerhalb des in sich geschlossenen Kurvenzugs mit einem Werkstoff belegt ist! Zur Selektion der zielführenden Geraden aus der Geradenschar wählt man einen beliebigen  $E_2$ -Wert, setzt ihn zusammen mit dem S-Wert in die nach  $E_1$  aufgelöste Beziehung aus Schritt IV ein und erhält den korrespondierenden  $E_1$ -Wert. Der frei gewählte  $E_2$ -Wert und der sich ergebende  $E_1$ -Wert führen zu einem Punkt in der  $\log E_1$ - $\log E_2$ -Graphik, durch den die zielführende Gerade verläuft. Alle Werkstoffe, die auf dieser Geraden anzutreffen sind, erfüllen alle geforderten Randbedingungen. Wird nun der  $E_1$ - oder der  $E_2$ -Wert in die entsprechende Beziehung aus Schritt II eingesetzt, so ergibt sich unmittelbar die für die Auslegung noch ausstehende Wanddicke. Die Belegung der Fläche innerhalb eines in sich geschlossenen Linienzugs aus Bild 1.3 mit konkreten  $E_1$ - $E_2$ -Konfigurationen setzt den Aufbau und die Auswertung von **Werkstoffdatenbanken** voraus.

Die Darstellung der Inhalte solcher Datenbanken im Rahmen dieses Buches und damit die werkstoffliche Konkretisierung aller möglichen  $E_1$ - $E_2$ -Konfigurationen würde zum einen den Rahmen dieses Buches bei weitem sprengen und ist vor dem Hintergrund der permanenten Entwicklung der Werkstoffwelt auch kaum sinnvoll, erfordert sie doch die fortwährende Pflege solcher Datenbanken durch die Einarbeitung neuerdings interessant gewordener Eigenschaften bekannter Werkstoffe und der Aufnahme der Eigenschaften neuer Werkstoffe. Dies betreibt mit großer Professionalität Granta Design Ltd. und stellt sie elektronisch in Form der CES EduPack Software [1] bereit. Aus diesem Grund beschränkt sich dieses Buch darauf, einen analytischen Weg von der Beanspruchung des Bauteils zur Wahl einer zielführenden **Werkstofffamilie** aufzuzeigen.

Die Werkstoffe, die zur Auslegung eines Bauteils zur Verfügung stehen, lassen sich zu sechs **Werkstoffklassen** zusammenfassen (Bild 1.4). Durch Unterteilung der Werkstoffklassen ergeben sich die in Bild 1.5 aufgelisteten Werkstofffamilien.



**Bild 1.4** Die sechs Wirkstoffklassen

<b>Konstruktionsmetalle</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminiumlegierungen (Al)</li> <li>Kupferlegierungen (Cu)</li> <li>Bleilegierungen (Pb)</li> <li>Magnesiumlegierungen (Mg)</li> <li>Nickellegierungen (Ni)</li> <li>Stähle</li> <li>Zinnlegierungen (Sn)</li> <li>Titanlegierungen (Ti)</li> <li>Wolframlegierungen (W)</li> <li>Zinklegierungen (Zn)</li> </ul>	<b>Konstruktionspolymere</b> (Thermoplaste, Duroplaste)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Epoxy (EP)</li> <li>Melamin (MEL)</li> <li>Polycarbonat (PC)</li> <li>Polyester (PEST)</li> <li>Polyethylen, High-Density (HDPE)</li> <li>Polyethylen, Low-Density (LDPE)</li> <li>Polyformaldehyd (PF)</li> <li>Polymethylmethacrylat (PMMA)</li> <li>Polypropylen (PP)</li> <li>Polytetrafluorethylen (PTFE)</li> <li>Polyvinylchlorid (PVC)</li> </ul>
<b>Konstruktionskeramiken</b> (hochfeste Feinkeramiken)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aluminiumoxid (<math>Al_2O_3</math>)</li> <li>Diamant (C)</li> <li>SiAlON</li> <li>Siliziumkarbid (SiC)</li> <li>Siliziumnitrid (<math>Si_3N_4</math>)</li> <li>Zirkonoxid (<math>ZrO_2</math>)</li> </ul>	<b>Elastomere</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Naturgummi</li> <li>Hartbutylgummi</li> <li>Polyurethan (PU)</li> <li>Silicongummi</li> <li>Weichbutylgummi</li> </ul>
<b>Poröse Keramik</b> (niedrigfeste Grobkeramik)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ziegel</li> <li>Zement</li> <li>Gesteine</li> <li>Beton</li> <li>Porzellan</li> <li>Ton</li> </ul>	<b>Polymerschäume</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kork</li> <li>Polyester (PEST)</li> <li>Polystyrol (PS)</li> <li>Polyurethan (PU)</li> </ul>
<b>Silikatgläser</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Borsilikatgläser (B-Glas)</li> <li>Natriumglas (Na-Glas)</li> <li>Siliziumoxid (<math>SiO_2</math>)</li> </ul>	<b>Hölzer</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Esche</li> <li>Balsa</li> <li>Fichte</li> <li>Eiche</li> <li>Kiefer</li> </ul>

**Bild 1.5** Die sieben Werkstofffamilien innerhalb der sechs Werkstoffklassen

Die Eigenschaften der Werkstoffe sind ein Resultat von Mechanismen, die auf atomarer Ebene ablaufen. Diese differieren, über das gesamte Werkstoffspektrum betrachtet, so stark, dass viele Eigenschaften einen über nahezu 5 Dekaden reichenden Wertebereich aufweisen. Innerhalb einer Werkstoffklasse ist der maximal mögliche Wertebereich aber schon deutlich kleiner, da die Mechanismen, die den Eigenschaften zugrunde liegen, ähnlicher sind. Nachfolgend soll in Erfahrung gebracht werden, warum die Werkstoffeigenschaften von Werkstoffklasse zu Werkstoffklasse so stark differieren.

# 2

## Grundlagen

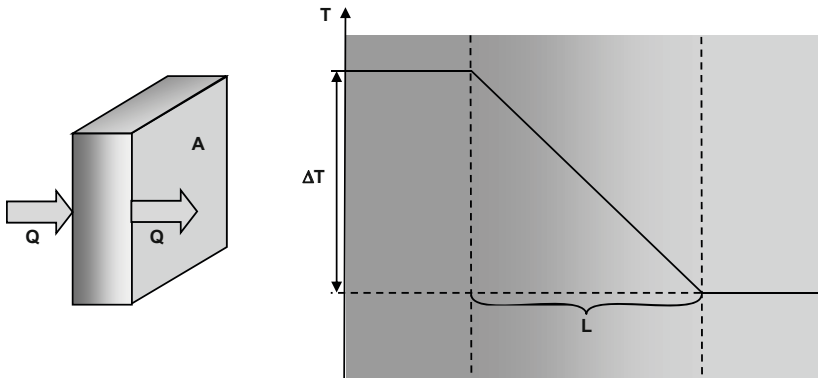
### ■ 2.1 Wärmeleitfähigkeit – Temperaturleitfähigkeit

Wärme strömt längs eines Temperaturgefälles. Die transportierte **Wärmemenge**  $Q$ , die in der Zeit  $t$  durch den Querschnitt  $A$  transportiert wird, bezeichnet man als **Wärmefluss**  $q$ :

$$q = \frac{Q}{A \cdot t} \quad (2.1)$$

#### 2.1.1 Wärmeleitfähigkeit

Fließt in eine Platte der Dicke  $L$  auf der Vorderseite die gleiche Wärmemenge hinein wie auf der Rückseite hinaus (stationärer Zustand; Bild 2.1), so steigt mit zunehmender werkstoffspezifischer Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  und zunehmendem Temperaturgefälle  $\Delta T/L$  und die Intensität des Wärmeflusses. Hierfür kann man eine Beziehung formulieren, die mit dem 1. Fick'schen Gesetz der Diffusion vergleichbar ist:



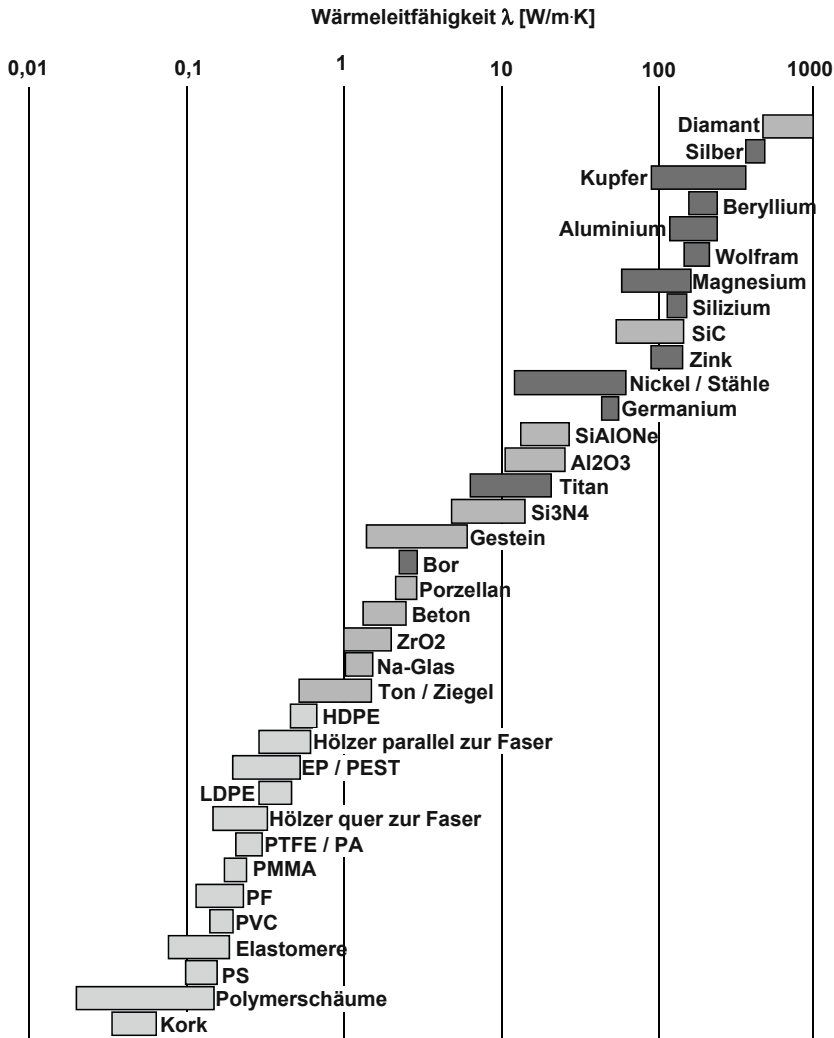
**Bild 2.1** Stationärer Wärmefluss

$$q = \lambda \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2.2)$$

Die transportierte Wärmemenge  $Q$  berechnet sich aus (2.1) und (2.2) zu

$$Q = A \cdot t \cdot \lambda \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2.3)$$

Bild 2.2 zeigt die Wärmeleitfähigkeiten, die für verschiedene Werkstoffe bei Raumtemperatur ermittelt wurden.



**Bild 2.2** Bei Raumtemperatur ermittelte Wärmeleitfähigkeiten

## Metalle

Metalle zeigen aufgrund der **freien Elektronen** eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit. Bei Reinetallen ist die mittlere freie Weglänge der Elektronen sogar so groß, dass man bei ihnen die höchste Wärmeleitfähigkeit antrifft. In **Legierungen** werden die Elektronen an Legierungsatomen gestreut, was die mittlere freie Weglänge und damit die Wärmeleitfähigkeit etwas reduziert.

Bei Keramik, Silikatglas und Polymeren sind keine freien Elektronen vorhanden. Deshalb kann die Wärme hier allein durch elastische Gitterschwingungen (**Phononen**) geleitet werden:

## Keramik

Zwischen ihren Bausteinen liegen bei Keramik die hochfeste **Atombindung** und die feste **Ionenbindung** vor, wodurch sich die Gitterschwingungen mit hoher Geschwindigkeit ausbreiten sollten. Allerdings werden die Gitterschwingungen bei polykristalliner Keramik an inneren und äußeren Grenzflächen gestreut, was die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gitterschwingungen hier reduziert. Letztendlich sind die Wärmeleitfähigkeiten polykristalliner Keramik geringer als bei Legierungen. Liegt jedoch ein keramischer Einkristall vor (beispielsweise Diamant) und ist die Temperatur hinreichend niedrig, so ist die Weglänge ungestörter Gitterschwingungen so groß, dass diese Werkstoffe eine den Reinetallen vergleichbare Wärmeleitfähigkeit aufweisen.

## Silikatglas

Zwischen den Bausteinen des Silikatglases liegen die hochfeste **Atombindung** und die feste **Ionenbindung** vor, wodurch sich die Gitterschwingungen mit hoher Geschwindigkeit ausbreiten sollten. Allerdings zeigt Silikatglas durchgehend eine amorphe Struktur, wodurch die Weglänge ungestörter Gitterschwingungen und damit die Wärmeleitfähigkeit kleiner sind als bei Keramik.

## Polymere

Polymere bestehen aus Makromolekülen, innerhalb deren die hochfeste Atombindung angetroffen wird.

Bei den **amorphen Thermoplasten** sind die **Makromoleküle** aus entropischen Gründen durchgehend verknäuel und verschlauft. Zwischen räumlich nahe beieinander liegenden Makromolekülsegmenten sind bei Raumtemperatur **Restvalenzbindungen** anzutreffen, die thermisch induzierte Schwingungen der Makromoleküle behindern.

Bei den **teilkristallinen Thermoplasten** sind die Makromoleküle infolge ihres regelmäßigen Aufbaus über gewisse Strecken mäanderförmig gefaltet. Innerhalb dieser Kristallite bilden sich zwischen den Mäanderschleifen Restvalenzbindungen, die die thermisch induzierten Schwingungen der Makromoleküle innerhalb der **Kristallite** verhindern und wegen der kurzen Abstände der Bindungspartner im Vergleich zu den Restvalenzbindungen der amorphen Thermoplaste stark sind. Die Kristallite sind eingebettet in eine amorphe Masse, innerhalb der die Makromoleküle aus entropischen Gründen durchgehend verknäuel und verschlauft vorliegen. Bei Raumtemperatur sind hier zwischen räumlich nahe beieinander liegenden Makromolekülsegmenten Restvalenzbindungen anzutreffen,

die thermisch induzierte Schwingungen der Makromoleküle behindern. Insgesamt ist die Wärmeleitfähigkeit der teilkristallinen Thermoplaste größer als die der amorphen Thermoplaste.

**Duroplaste** weisen zwischen den Makromolekülen neben Restvalenzbindungen in großer Häufigkeit vernetzende hochfeste **Atombindungen** auf, weswegen ihre Wärmeleitfähigkeit der der teilkristallinen Thermoplaste vergleichbar ist.

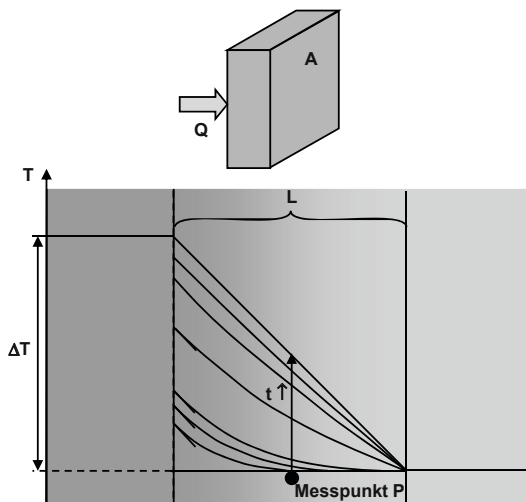
**Elastomere** weisen zwischen den Makromolekülen im Vergleich zu den Duroplasten in geringer Häufigkeit vernetzende hochfeste **Atombindungen** auf, wodurch deren Wärmeleitfähigkeit geringer als die der teilkristallinen Thermoplaste ist.

### Poröse Strukturen

Die geringste Wärmeleitfähigkeit zeigen wegen der gasigen Füllungen ihrer Zellen poröse Strukturen wie polymere **Schäume**, poröse Keramik (Feuerfestwerkstoffe und Ziegel) sowie Kork.

## 2.1.2 Temperaturleitfähigkeit

Wenn der Wärmezufuss in die Platte hinein dem Wärmeabfluss aus der Platte hinaus nicht entspricht, so ändert sich der Wärmeinhalt der Platte (instationärer Zustand). Bild 2.3 zeigt dies für eine zuvor isotherme Platte der Dicke  $L$ , deren Temperatur auf der Vorderseite erhöht wird und auf der Rückseite konstant gehalten wird.

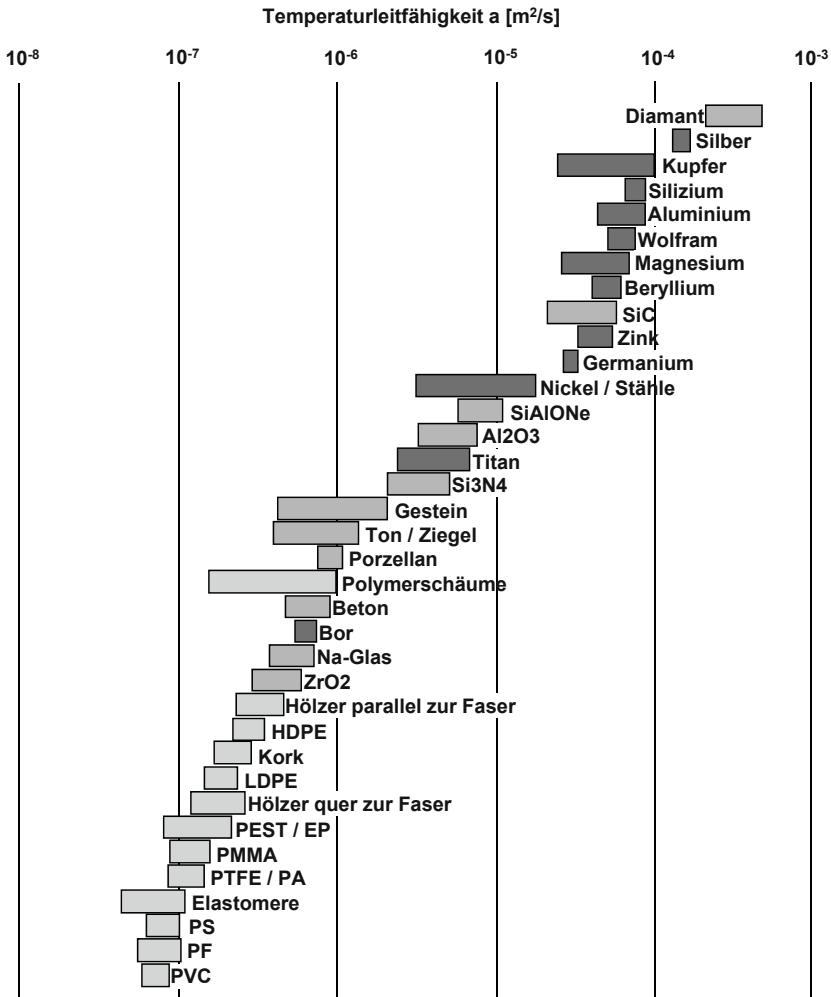


**Bild 2.3** Instationärer Wärmefluss nach Temperaturerhöhung auf der Vorderseite einer Platte

An dem beliebigen Punkt P des Querschnitts ändert sich die Temperatur im Laufe der Zeit entsprechend der allgemeinen Wärmeleitungsgleichung

$$\frac{dT}{dt} = \alpha \cdot \frac{d^2T}{dL^2} \quad (2.4)$$

Diese Beziehung ist mit dem 2. Fick'schen Gesetz der Diffusion vergleichbar. Die werkstoffspezifische Proportionalitätskonstante trägt die Bezeichnung Temperaturleitfähigkeit. Bild 2.4 zeigt die Temperaturleitfähigkeiten, die für verschiedene Werkstoffe bei Raumtemperatur ermittelt wurden.



**Bild 2.4** Bei Raumtemperatur ermittelte Temperaturleitfähigkeiten

Die Temperaturleitfähigkeit berechnet sich mit der Dichte  $\rho$ , der **Wärmekapazität**  $c$  und der **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  des Werkstoffs zu

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \quad (2.5)$$