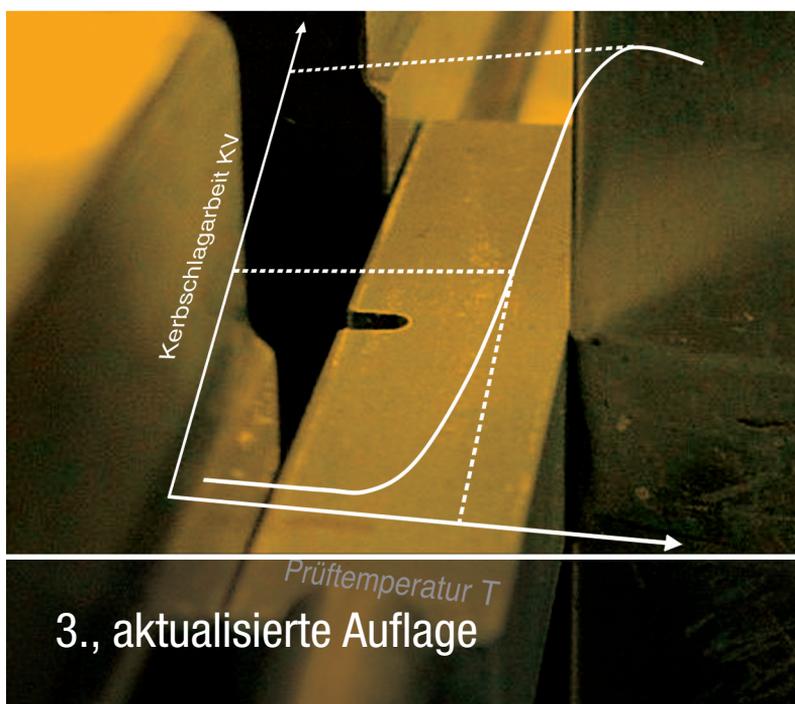


Burkhard Heine

# Werkstoffprüfung

Ermittlung der Eigenschaften  
metallischer Werkstoffe



HANSER

Burkhard Heine  
Werkstoffprüfung



Burkhard Heine

# Werkstoffprüfung

Ermittlung der Eigenschaften metallischer  
Werkstoffe

3., aktualisierte Auflage  
mit 363 Bildern und zahlreichen Tabellen



**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 978-3-446-44455-3  
E-Book-ISBN 978-3-446-44505-5

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 elektro-  
nischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2015 Carl Hanser Verlag München  
<http://www.hanser-fachbuch.de>  
Lektorat: Christine Fritzsch  
Herstellung: Katrin Wulst  
Satz: le-tex, Leipzig  
Coverrealisierung: Stephan Rönigk  
Druck und Bindung: Friedrich Pustet, Regensburg

Printed in Germany

# Vorwort

Eine Aufgabe des Ingenieurs ist es, dafür Sorge zu tragen, dass die Bauteile, die in seinen Konstruktionen zum Einsatz kommen, allen vorgesehenen Beanspruchungen gerecht werden und eine hohe Lebensdauer bei einem geringen Instandsetzungsbedarf aufweisen. Der erste Schritt zur problemlosen Interaktion der Bauteile stellt dabei die Festschreibung einer zweckdienlichen Gestalt der Bauteile dar, zum Beispiel in Gestalt einer Zeichnung. Im zweiten Schritt erfolgt die Wahl eines zweckdienlichen Werkstoffs, wobei sich der Ingenieur an den Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Werkstoffe orientiert. Das vorliegende Buch soll bei der Ermittlung der Eigenschaften unterstützen, die für die metallischen Konstruktionswerkstoffe relevant sind.

In der 3. Auflage wurden noch bestehende Fehler beseitigt. Weiterhin sind einige Normnummern ergänzt bzw. durch inzwischen aktualisierte Nummern ersetzt worden.

Das Buch richtet sich an Studierende der Werkstofftechnik, des Maschinenbaus und der Fertigungstechnik sowie an Ingenieure in der Industrie. Daneben ist das Buch auch als Handbuch zur experimentellen Begleitung einer einführenden Vorlesung in die Werkstoffkunde konzipiert, was die Reihenfolge der Kapitel bestimmte: Kapitel 1 wurde geteilt und in den Grundlagenteil von Folgekapiteln integriert. Kapitel 2 führt die *Ermittlung der bindungsbasierenden nichtmechanischen Eigenschaften* Zustandsänderungstemperaturen, spezifische Umwandlungswärmen, linearer Wärmeausdehnungskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit an. Kapitel 3 wurde im Grundlagenteil erweitert und beschreibt die *Ermittlung des Kristallgitters beziehungsweise der Kristallstruktur* mit ihren Gitterparametern. Kapitel 4 stellt die *Ermittlung der kristallstrukturbasierenden nichtmechanischen Eigenschaften* Dichte und Temperatur einer allotropen Umwandlung vor. Kapitel 5 beschreibt die *Darstellung kristallbaufehlerbasierender nichtmechanischer Eigenschaften* auf lichtmikroskopischem und elektronenmikroskopischem Weg sowie durch zerstörungsfreie Prüfung. Kapitel 6 zeigt Wege der *Darstellung der mechanischen Eigenschaften rissfreier Proben bei steigender Beanspruchung* auf. Hierzu zählen der Zugversuch, für den der Einfluss der Temperatur und Verformungsgeschwindigkeit aufgenommen wurde, der Druckversuch, der Torsionsversuch, der Biegeversuch sowie die Härteprüfung, bei der auch die modernen Prüfverfahren angesprochen werden. Kapitel 7 befasst sich mit der *Ermittlung der mechanischen Eigenschaften rissfreier Proben bei statischer Beanspruchung*. Kapitel 8 zeigt Wege zur *Darstellung der mechanischen Eigenschaften rissfreier Proben bei dynamischer Beanspruchung* auf. Hierbei wird sowohl eine spannungskontrollierte als auch eine dehnungskontrollierte Versuchsführung berücksichtigt. Kapitel 9 führt Möglichkeiten an, die *mechanischen Eigenschaften angerissener Proben bei steigender Beanspruchung sowie dynamischer Beanspruchung* zu beschreiben. Hierzu zählen der Kerbschlagbiegeversuch, der instrumentierte Kerbschlagbiegeversuch und bauteilsimulierende Versuche, zu denen auch Bruchmechanikversuche gehören.

Ich bedanke mich beim Carl Hanser Verlag, der das Buch erneut in einer ansprechenden Gestaltung anbieten kann. Mein großer Dank gilt wieder Frau Christine Fritsch und Frau Katrin Wulst, die durch die Durchsicht des Manuskripts zum Gelingen des Buches beigetragen haben.

Aalen, im März 2015

Burkhard Heine

# Inhalt

Vorwort.....	5
<b>1</b> Einleitung.....	<b>15</b>
Weiterführende Literatur.....	21
<b>2</b> Bindungsbasierende nichtmechanische Eigenschaften.....	<b>22</b>
2.1 Zustandsänderungstemperaturen.....	22
2.1.1 Anordnung.....	24
2.1.2 Durchführung.....	27
2.1.3 Ergebnis.....	29
2.2 Spezifische Umwandlungswärmen.....	29
2.2.1 Anordnung.....	29
2.2.2 Durchführung.....	29
2.2.3 Ergebnis.....	31
2.3 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient.....	31
2.3.1 Anordnung und Durchführung.....	32
2.3.2 Ergebnis.....	33
2.4 Wärmeleitfähigkeit.....	33
2.4.1 Anordnung und Durchführung.....	34
2.4.2 Ergebnis.....	34
Weiterführende Literatur.....	34
<b>3</b> Kristallgitter – Kristallstruktur .....	<b>36</b>
3.1 Grundlagen.....	36
3.1.1 Millersche Indizes – Netzebenenabstand.....	36
3.1.2 Elektronenstrahlung und Röntgenstrahlung.....	42
3.1.2.1 Elektronenstrahlung.....	42
3.1.2.2 Röntgenstrahlung.....	43
3.1.3 Beugung von Strahlung an Kristallgittern.....	49
3.1.3.1 Kubisch-raumzentrierte Kristallstruktur.....	53
3.1.3.2 Kubisch-flächenzentrierte Kristallstruktur .....	54
3.1.4 Reziprokes Gitter.....	55
3.2 Feinstrukturanalyse.....	57
3.2.1 Einkristalle .....	57
3.2.1.1 Anordnung und Durchführung.....	57
3.2.1.2 Ergebnis .....	58

3.2.2	Einzelne Kristalle eines Polykristalls.....	60
3.2.2.1	Anordnung und Durchführung.....	61
3.2.2.2	Ergebnis.....	64
3.2.3	Einkristallschüttung, Pulverschüttung, polykristalline Massivprobe.....	65
3.2.3.1	Anordnung und Durchführung.....	65
3.2.3.2	Ergebnis.....	66
	Weiterführende Literatur.....	72
<b>4</b>	<b>Kristallstrukturbasierende nichtmechanische Eigenschaften</b>	<b>73</b>
4.1	Dichte.....	73
4.1.1	Anordnung und Durchführung.....	73
4.1.2	Ergebnis.....	73
4.2	Temperatur einer allotropen Umwandlung.....	75
4.2.1	Anordnung und Durchführung.....	75
4.2.2	Ergebnis.....	75
	Weiterführende Literatur.....	76
<b>5</b>	<b>Kristallbaufehlerbasierende nichtmechanische Eigenschaften.....</b>	<b>77</b>
5.1	Chemische Zusammensetzung.....	77
5.1.1	Grundlagen.....	77
5.1.2	Atomemissionsspektroskopie.....	79
5.1.2.1	Anordnung und Durchführung.....	79
5.1.2.2	Ergebnis.....	80
5.1.3	Elektronenstrahlmikroanalyse.....	81
5.1.3.1	Anordnung und Durchführung.....	81
5.1.3.1.1	Wellenlängendispersives Röntgenspektrometer.....	82
5.1.3.1.2	Energiedispersives Röntgenspektrometer.....	84
5.1.3.1.3	Punktanalyse.....	85
5.1.3.1.4	Linienanalyse.....	85
5.1.3.1.5	Flächenanalyse.....	86
5.1.3.2	Ergebnis.....	86
5.1.4	Röntgenfluoreszenzanalyse.....	87
5.1.4.1	Anordnung und Durchführung.....	87
5.1.4.2	Ergebnis.....	87
5.2	Mikroskopische Darstellung von Gefüge, Oberfläche, Bruchfläche und lokalen Werkstofftrennungen.....	88
5.2.1	Lichtmikroskopische Darstellung von Gefüge und von lokalen Werkstofftrennungen.....	90
5.2.1.1	Anordnung und Durchführung.....	91
5.2.1.1.1	Probennahme.....	92
5.2.1.1.2	Schliffherstellung.....	93
5.2.1.1.3	Gefügeentwicklung.....	96
5.2.1.1.4	Gefügedarstellung.....	101

5.2.1.2	Ergebnis .....	106
5.2.1.2.1	Flächenanalyseverfahren .....	107
5.2.1.2.2	Linienanalyseverfahren.....	108
5.2.1.2.3	Punktanalyseverfahren .....	109
5.2.1.2.4	Quantitative Bildanalyse .....	110
5.2.2	Transmissionselektronenmikroskopische Darstellung des Gefüges .....	111
5.2.2.1	Anordnung und Durchführung.....	111
5.2.2.2	Ergebnis .....	113
5.2.3	Rasterelektronenmikroskopische Darstellung von Gefüge, Oberfläche, Bruchfläche und lokalen Werkstofftrennungen.....	114
5.2.3.1	Anordnung und Durchführung.....	114
5.2.3.2	Ergebnis .....	118
5.3	Zerstörungsfreie Darstellung von lokalen Werkstofftrennungen.....	118
5.3.1	Röntgenstrahlverfahren .....	119
5.3.1.1	Anordnung und Durchführung.....	120
5.3.1.2	Ergebnis .....	122
5.3.2	Ultraschallwellenverfahren .....	126
5.3.2.1	Grundlagen.....	126
5.3.2.2	Anordnung und Durchführung.....	133
5.3.2.3	Ergebnis .....	137
5.3.3	Wirbelstromverfahren .....	139
5.3.3.1	Anordnung und Durchführung.....	139
5.3.3.2	Ergebnis .....	140
5.3.4	Streuflussverfahren .....	141
5.3.4.1	Anordnung und Durchführung.....	141
5.3.4.2	Ergebnis .....	144
5.3.5	Thermographie .....	145
5.3.5.1	Anordnung und Durchführung.....	145
5.3.5.2	Ergebnis .....	145
5.3.6	Penetrationsverfahren .....	146
5.3.6.1	Anordnung und Durchführung.....	146
5.3.6.2	Ergebnis .....	147
	Weiterführende Literatur.....	148

**6 Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei steigender Beanspruchung ..... 150**

6.1	Zugversuch.....	150
6.1.1	Anordnung.....	151
6.1.2	Durchführung .....	153
6.1.3	Ergebnis.....	155
6.1.3.1	$\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	155
6.1.3.1.1	Bereich der elastischen Dehnung.....	156
6.1.3.1.2	Kontinuierlicher Übergang zur elastisch/plastischen Dehnung.....	157

6.1.3.1.3	Diskontinuierlicher Übergang zur elastisch/plastischen Dehnung.....	158
6.1.3.1.4	Bereich der elastisch/plastischen Dehnung .....	160
6.1.3.2	$\sigma_w$ - $\epsilon_w$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	162
6.1.3.2.1	Bereich der elastischen Dehnung .....	162
6.1.3.2.2	Gleichmaßdehnungsbereich .....	163
6.1.3.2.3	Einschnürdehnungsbereich.....	164
6.1.3.3	Entfestigung und Verfestigung bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ im Wettbewerb	165
6.1.3.3.1	$\varphi < \varphi_g$ .....	166
6.1.3.3.2	$\varphi = \varphi_g$ .....	167
6.1.3.3.3	$\varphi > \varphi_g$ .....	169
6.1.3.4	Temperatureinfluss auf die Fließkurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	169
6.1.3.4.1	Fließgrenze.....	170
6.1.3.4.2	Fließspannung .....	172
6.1.3.5	Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit auf die Fließkurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	173
6.1.3.5.1	Fließgrenze.....	173
6.1.3.5.2	Fließspannung .....	174
6.1.3.6	Verformungsgeschwindigkeitseinfluss auf die Fließkurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$ .....	179
6.1.3.7	Versuchsergebnis bei anisotropem Verformungsverhalten .....	188
6.1.4	Zerstörungsfreie Ermittlung des Elastizitätsmoduls.....	191
6.2	Druckversuch .....	193
6.2.1	Anordnung.....	193
6.2.2	Durchführung .....	196
6.2.3	Ergebnis.....	198
6.2.3.1	$\sigma$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	198
6.2.3.2	$\sigma_w$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	200
6.2.3.3	$\sigma_w$ - $\epsilon$ -Kurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$ .....	201
6.3	Torsionsversuch .....	201
6.3.1	Anordnung.....	202
6.3.2	Durchführung .....	203
6.3.3	Ergebnis.....	203
6.3.3.1	$\tau_R$ - $\gamma_R$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	204
6.3.3.2	$\tau_R$ - $\gamma_R$ -Kurve bei $T > 0,4 \cdot T_s$ .....	207
6.4	Biegeversuch.....	210
6.4.1	Anordnung.....	210
6.4.2	Durchführung .....	211
6.4.3	Ergebnis.....	212
6.5	Härteprüfung .....	217
6.5.1	Ritzhärteprüfung.....	217
6.5.2	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Brinell.	221
6.5.2.1	Anordnung.....	221
6.5.2.2	Durchführung .....	222
6.5.2.3	Ergebnis .....	223
6.5.3	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Vickers	224

6.5.3.1	Anordnung.....	225
6.5.3.2	Durchführung .....	227
6.5.3.3	Ergebnis .....	227
6.5.4	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Knoop..	229
6.5.4.1	Anordnung.....	229
6.5.4.2	Durchführung .....	230
6.5.4.3	Ergebnis .....	230
6.5.5	Quasistatisch ablaufende Eindringhärteprüfung nach Rockwell .....	231
6.5.5.1	Anordnung.....	231
6.5.5.2	Durchführung .....	234
6.5.5.3	Ergebnis .....	234
6.5.6	Vergleich von Härtewerten untereinander und mit der Zugfestigkeit.....	237
6.5.7	Instrumentierte Eindringhärteprüfung .....	238
6.5.7.1	Anordnung.....	238
6.5.7.2	Durchführung .....	240
6.5.7.3	Ergebnis .....	241
6.5.7.3.1	Martenshärte.....	241
6.5.7.3.2	Eindringhärte.....	242
6.5.7.3.3	Eindringmodul.....	243
6.5.7.3.4	Elastische Verformungsarbeit.....	244
6.5.8	Dynamisch ablaufende Härteprüfverfahren .....	245
6.5.8.1	Dynamisch ablaufende Eindringhärteprüfverfahren .....	245
6.5.8.1.1	Poldihammer .....	246
6.5.8.1.2	Baumannhammer .....	246
6.5.8.1.3	UCI-Verfahren .....	247
6.5.8.2	Dynamisch ablaufende Rücksprunghärteprüfverfahren .....	248
6.5.8.2.1	Rücksprunghärteprüfung nach Shore .....	248
6.5.8.2.2	Rücksprunghärteprüfung nach Leeb.....	249
6.5.9	Härteprüfung bei höheren Temperaturen .....	249
	Weiterführende Literatur.....	252

**7**

**Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei statischer Beanspruchung ..... 255**

7.1	Versuchsanordnung.....	256
7.2	Versuchsdurchführung .....	258
7.3	Versuchsergebnis .....	258
7.3.1	Kriechkurve.....	258
7.3.2	Zeitdehnschaubild .....	263
7.3.3	Zeitstandschaubild .....	264
7.4	Lebensdauerabschätzungen .....	266
	Weiterführende Literatur.....	273

<b>8</b>	<b>Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei dynamischer Beanspruchung.....</b>	<b>274</b>
8.1	Anordnung .....	274
8.2	Durchführung.....	275
8.2.1	Spannungskontrollierte Durchführung .....	279
8.2.2	Dehnungskontrollierte Durchführung .....	280
8.3	Ergebnis .....	286
8.3.1	Ergebnis einer spannungskontrollierten Durchführung.....	286
8.3.2	Ergebnis einer dehnungskontrollierten Durchführung.....	288
8.3.3	Mathematische Beschreibung .....	288
8.3.4	Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse .....	293
8.3.5	Einflüsse auf das Ergebnis .....	297
8.3.5.1	Probenausführung .....	297
8.3.5.1.1	Zugfestigkeit.....	297
8.3.5.1.2	Probenquerschnitt.....	298
8.3.5.1.3	Kerbwirksamkeit .....	298
8.3.5.1.4	Druckeigenstressungen .....	299
8.3.5.2	Versuchsparameter .....	299
8.3.5.2.1	Mittelspannung.....	300
8.3.5.2.2	Beanspruchungsform .....	301
8.3.5.2.3	Mehrstufige Beanspruchung .....	302
8.3.5.2.4	Beanspruchungsfrequenz und Temperatur .....	304
	Weiterführende Literatur.....	308
<b>9</b>	<b>Mechanische Eigenschaften angerissener Proben bei steigender Beanspruchung.....</b>	<b>310</b>
9.1	Grundlagen.....	313
9.1.1	Theoretische Bruchspannung.....	313
9.1.2	Mögliche Beanspruchungsfälle .....	314
9.1.3	Bruchbegünstigende Wirkung von Rissen bei linear-elastischem Probenverhalten .....	315
9.1.3.1	Erhöhung der Nennspannung.....	315
9.1.3.2	Überhöhung der Zugspannung.....	315
9.1.3.3	Mehrachsiger Spannungszustand .....	321
9.1.3.4	Mikroskopische Gesichtspunkte eines Spaltbruchs.....	323
9.1.4	Bruchbegünstigende Wirkung von Rissen bei quasi linear-elastischem Probenverhalten .....	325
9.1.4.1	Elastisch/ideal-plastisches Werkstoffverhalten.....	325
9.1.4.2	Elastisch/real-plastisches Werkstoffverhalten .....	329
9.1.4.3	Mikroskopische Gesichtspunkte eines Gleitbruchs .....	333
9.1.5	Temperaturabhängigkeit des Bruchverhaltens .....	335
9.1.5.1	Glatte Proben eines kubisch-raumzentriert oder hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffs.....	335
9.1.5.1.1	Temperaturbereich I .....	336
9.1.5.1.2	Temperaturbereich II.....	336

9.1.5.1.3	Temperaturbereich III.....	337
9.1.5.1.4	Temperaturbereich IV.....	338
9.1.5.1.5	Temperaturbereich V .....	338
9.1.5.2	Angerissene Proben eines kubisch-raumzentriert oder hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffs .....	338
9.1.5.2.1	Temperaturbereich I .....	338
9.1.5.2.2	Temperaturbereich II .....	340
9.1.5.2.3	Temperaturbereich III.....	340
9.1.5.2.4	Temperaturbereich IV.....	340
9.1.5.2.5	Temperaturbereich V .....	340
9.1.5.3	Proben eines kubisch-flächenzentriert vorliegenden Werkstoffs .....	341
9.2	Kerbschlagbiegeversuch .....	341
9.2.1	Anordnung.....	342
9.2.2	Durchführung .....	343
9.2.3	Ergebnis.....	344
9.3	Instrumentierter Kerbschlagbiegeversuch .....	346
9.3.1	Anordnung.....	347
9.3.2	Durchführung .....	348
9.3.3	Ergebnis.....	348
9.4	Bauteilsimulierende Versuche .....	350
9.4.1	Großzugversuche .....	350
9.4.1.1	Anordnung.....	350
9.4.1.2	Durchführung .....	351
9.4.1.3	Ergebnis .....	351
9.4.2	Fallgewichtsversuch .....	351
9.4.2.1	Anordnung.....	352
9.4.2.2	Durchführung .....	352
9.4.2.3	Ergebnis .....	353
9.4.3	Rissauffangversuch .....	353
9.4.3.1	Anordnung.....	354
9.4.3.2	Durchführung .....	354
9.4.3.3	Ergebnis .....	354
9.4.4	Bauteilversuch .....	355
9.4.5	Bruchmechanische Versuche bei quasi linear-elastischem Probenverhalten .....	355
9.4.5.1	Anordnung.....	356
9.4.5.2	Durchführung .....	359
9.4.5.3	Ergebnis .....	361
9.4.6	Bruchmechanische Versuche bei elastoplastischem Probenverhalten .....	364
9.4.6.1	Rissspitzenaufweitung (CTOD-Verfahren) .....	365
9.4.6.1.1	Anordnung.....	365
9.4.6.1.2	Durchführung .....	365
9.4.6.1.3	Ergebnis .....	366
9.4.6.2	J-Integral .....	373
9.4.6.2.1	Anordnung.....	373

---

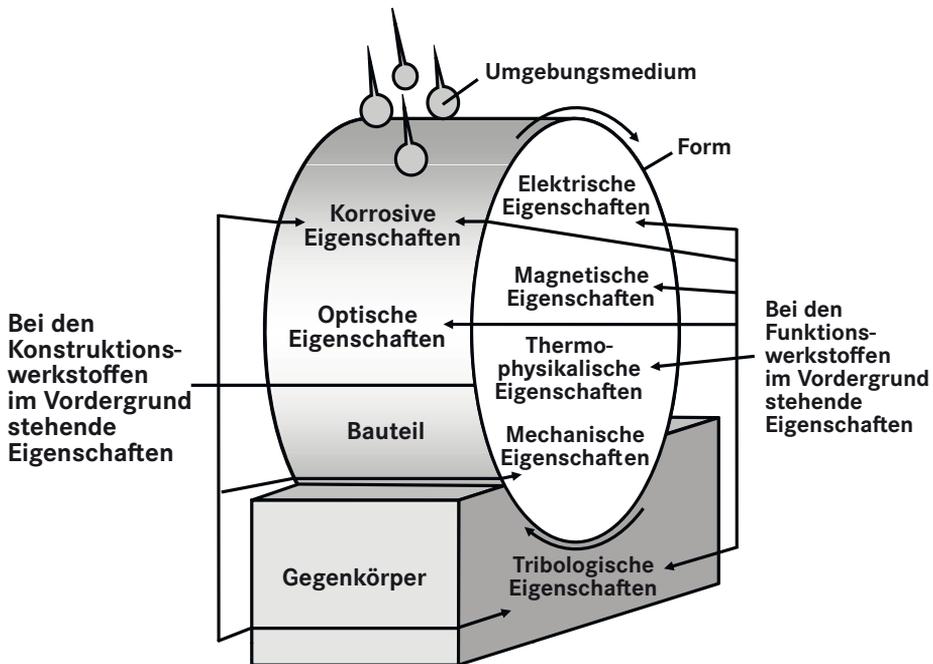
9.4.6.2.2	Durchführung .....	375
9.4.6.2.3	Ergebnis .....	376
9.4.6.3	Temperaturabhängigkeit der Risszähigkeit, der Rissspitzenaufweitung und des J-Integrals bei Werkstoffen mit einem Spröde/Zäh-Übergangsverhalten .....	382
9.4.7	Abschätzung des stabilen Risswachstums bei wechselnd belasteten Proben.....	383
9.4.7.1	Anordnung.....	384
9.4.7.2	Durchführung .....	386
9.4.7.3	Ergebnis .....	386
	Weiterführende Literatur.....	390
<b>Index</b> .....		<b>392</b>

# 1

## Einleitung

Bei der Wahl eines zweckdienlichen Werkstoffs orientiert sich der Ingenieur an den Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Werkstoffe.

Als **Werkstoffeigenschaften** sind die **optischen Eigenschaften**, **elektrischen Eigenschaften**, **magnetischen Eigenschaften** sowie die **thermophysikalischen Eigenschaften** zu nennen. Zu letzteren zählen der Verdampfungspunkt und die spezifische Verdampfungswärme, der Schmelzpunkt und die spezifische Schmelzwärme, der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient und die Wärmeleitfähigkeit sowie die Dichte (*Bild 1.1*).



**Bild 1.1** Eigenschaften eines Bauteils, seines Werkstoffs, des Systems Werkstoff/Umgebungsmedium beziehungsweise Werkstoff/Gegenkörper und bei den Konstruktionswerkstoffen beziehungsweise Funktionswerkstoffen im Vordergrund stehende Eigenschaften

Zu den Werkstoffeigenschaften zählen auch die mechanischen Eigenschaften, die bei Beanspruchung des Werkstoffs durch Kräfte beziehungsweise Spannungen zutage treten. **Kräfte** beziehungsweise **Spannungen** können dabei auf unterschiedliche Art und Weise zustande kommen. In jedem Fall herrscht die Gewichtskraft, die der **Dichte** des Werkstoffs

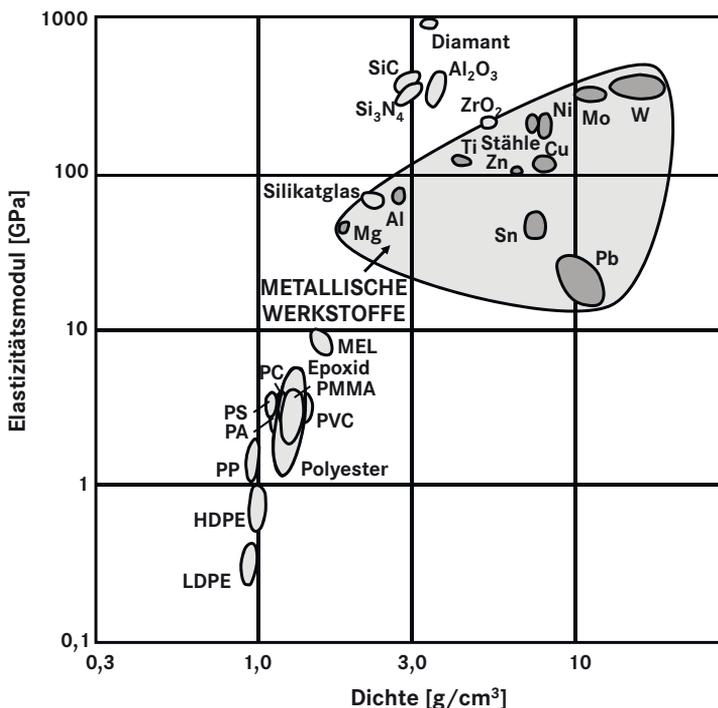
proportional ist. Wird in einen Werkstoff lokal eine Wärmemenge eingebracht, so stellt sich daneben infolge der stets endlichen **Wärmeleitfähigkeit** des Werkstoffs über eine gewisse Zeit eine inhomogene Temperaturverteilung ein. Sie hat dann ihrerseits Spannungen zur Folge, die dem linearen **Wärmeausdehnungskoeffizienten** des Werkstoffs proportional und der Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs umgekehrt proportional sind und auch als thermisch induzierte Spannungen bezeichnet werden. In den weitaus häufigsten Fällen werden Kräfte jedoch von außen in einen Werkstoff eingeleitet. Das oft ebenfalls zu den Werkstoffeigenschaften gezählte korrosive und tribologische Verhalten der Werkstoffe darf nach genauer Betrachtung nicht zu den Werkstoffeigenschaften gezählt werden, denn diese Verhaltensweisen sind, im Gegensatz zu den zuvor genannten Eigenschaften, immer die Folge einer Interaktion des Werkstoffs mit der jeweils gegebenen „Umgebung“, können also nie losgelöst von dieser angegeben werden: Liegt, die Werkstoffoberfläche berührend, ein Umgebungsmedium vor, so sind die an der Oberfläche ablaufenden korrosiven Prozesse mit der Möglichkeit von optischer Beeinträchtigung, Wanddickenverlust und/oder Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs vom Umgebungsmedium abhängig. Die **korrosiven Eigenschaften** sind also Eigenschaften des Systems Werkstoff/Umgebungsmedium. Analoges ist im zweiten Fall festzustellen: Liegt in Kontakt mit der Werkstoffoberfläche ein Gegenkörper vor, der sich relativ zur Berührfläche bewegt, so sind die tribologischen Prozesse, die an der Werkstoffoberfläche ablaufen und mit der Möglichkeit einer Bewegungsbeeinträchtigung und/oder der Gefahr eines als Verschleiß bezeichneten Wanddickenverlustes verbunden sind, vom Gegenkörper und seiner Bewegungsform abhängig. Aus diesem Grund sind die **tribologischen Eigenschaften** Eigenschaften des Systems Werkstoff/Gegenkörper.

Steht im Einsatz eines Bauteils dessen mechanische Beanspruchung im Vordergrund, so werden die Werkstoffe bei der werkstoffseitigen Auslegung des Bauteils vorrangig im Hinblick auf die Zweckdienlichkeit ihrer mechanischen Eigenschaften und – wegen der zuvor angesprochenen Verknüpfung zwischen den thermophysikalischen Eigenschaften und den durch sie hervorgerufenen Kräften beziehungsweise Spannungen – hinsichtlich ihrer thermophysikalischen Eigenschaften bewertet. Daneben muss diese Bewertung aber auch die korrosiven Eigenschaften des Systems Werkstoff/Umgebungsmedium und die tribologischen Eigenschaften des Systems Werkstoff/Gegenkörper betreffen, soweit sie die mechanischen Eigenschaften des Bauteils beeinflussen: Sind längere Nutzungszeiträume vorgesehen, so dürfen sich die Dimensionen eines Kräfte tragenden beziehungsweise Spannungen tragenden Bauteils sowie die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, aus dem es gefertigt wurde, über den Nutzungszeitraum gegenüber dem Ausgangsstatus nicht so weit verändern, dass das Bauteil versagt. Wie im letzten Abschnitt bereits ausgeführt, zählen zu den Prozessen, die im Laufe der Zeit Veränderungen der Bauteildimensionen und/oder der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe zur Folge haben können, die korrosiven und tribologischen Prozesse. Dies erklärt die Notwendigkeit, auch die korrosiven und die tribologischen Eigenschaften des Systems Werkstoff/Umgebung zu bewerten. Werkstoffe, die hinsichtlich aller genannten Aspekte zielführende Eigenschaften aufweisen, werden als **Konstruktionswerkstoffe** bezeichnet; im Gegensatz hierzu zeigen **Funktionswerkstoffe** zweckdienliche im Vordergrund stehende nichtmechanische Eigenschaften des Werkstoffs, des Systems Werkstoff/Umgebungsmedium beziehungsweise des Systems Werkstoff/Gegenkörper. In *Bild 1.1* sind Eigenschaften angeführt, die bei der Wahl eines Konstruktionswerkstoffs beziehungsweise eines Funktionswerkstoffs im Vordergrund stehen. Zu den Eigenschaften, die den metallischen Konstruktionswerkstoff

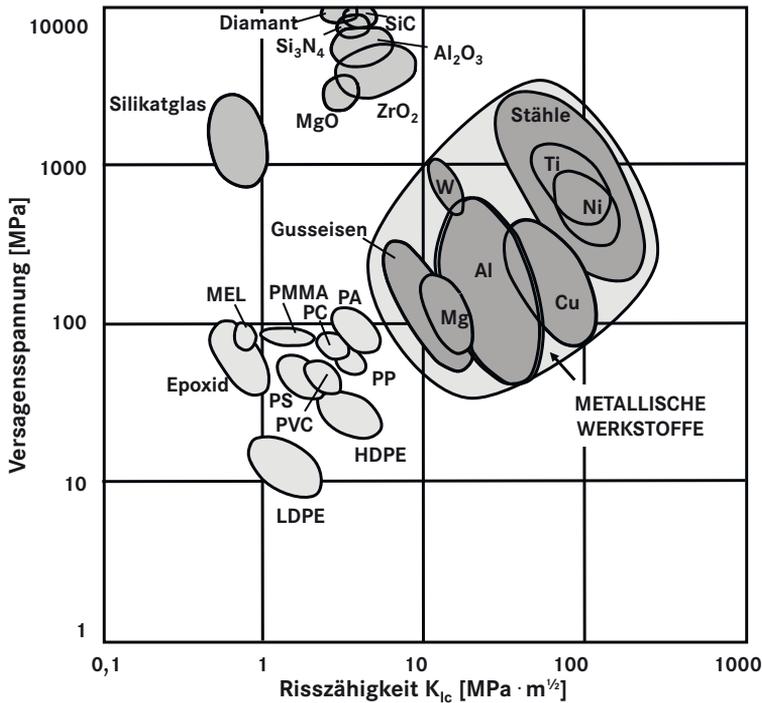
selbst beschreiben, zählen dessen strukturelle Eigenschaften sowie nichtmechanische und mechanische Volumeneigenschaften. Zu den mechanischen Werkstoffeigenschaften, die den Anwender von Konstruktionswerkstoffen primär interessieren, zählen die

- **Steifigkeit**, die sich bei elastischer Verformung offenbart und der wir in unserer Fachsprache die Bezeichnung **Elastizitätsmodul** gegeben haben (Er gibt das Verhältnis aus der mechanischen Spannung, die zum Erreichen einer elastischen Verformung eines Werkstoffs aufzubringen ist, und der mit Erreichen dieser Spannung messbaren elastischen Verformung an.),
- **Versagensspannung** (Mit ihrem Erreichen verhält sich ein Werkstoff erstmals nicht mehr nur elastisch.),
- **Risszähigkeit** (Sie ist ein Maß für die mechanische Spannung, mit deren Erreichen ein Riss, der in einem Werkstoff vorliegt, zu wachsen beginnt.),
- Temperaturabhängigkeit der Versagensspannung (Sie lässt erkennen, wie groß die Versagensspannung, die bei Erwärmung eines Werkstoffs abnimmt, bei einer konkreten Temperatur noch ist, was wir als die Warmfestigkeit eines Werkstoffs bezeichnen.).

Zunächst ist festzuhalten, dass, wie *Bild 1.2* zeigt, Pauschalaussagen hinsichtlich der Werkstoffeigenschaften immer nur für eine Werkstofffamilie (und selbst hier oft nur mit Einschränkungen) Gültigkeit haben.



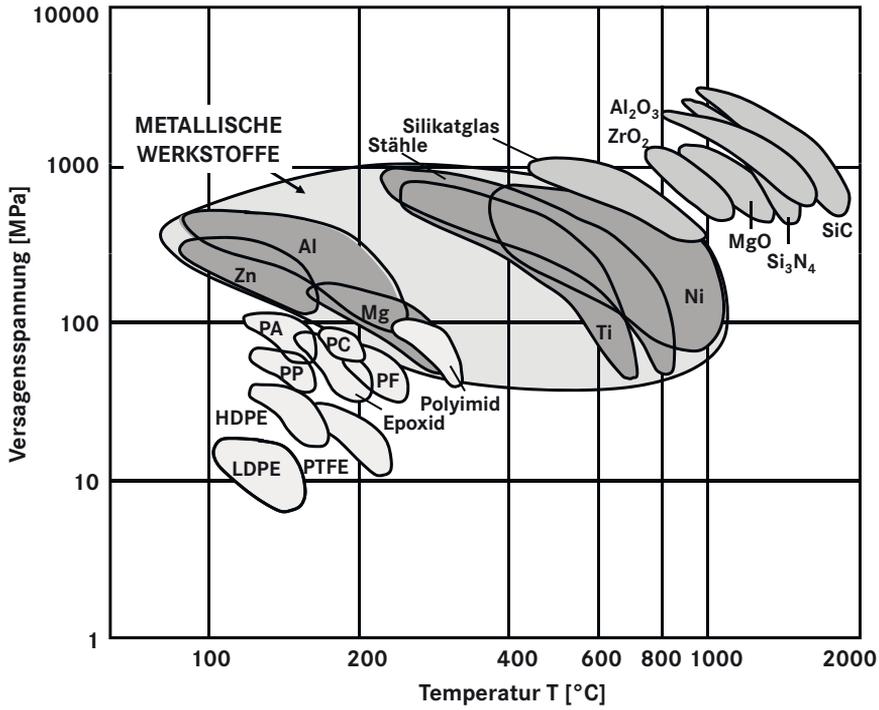
**Bild 1.2 a** Dichte und Elastizitätsmodul häufig verwendeter Konstruktionswerkstoffe bei Raumtemperatur nach Ashby<sup>1,1</sup>



**Bild 1.2 b** Risszähigkeit und bei Druckbeanspruchung anzutreffende Versagensspannung häufig verwendeter Konstruktionswerkstoffe bei Raumtemperatur nach Ashby<sup>1,1</sup>

Wie Bild 1.2 auch erkennen lässt, zeigen die metallischen Konstruktionswerkstoffe im Vergleich zu den polymeren und keramischen Konstruktionswerkstoffen ein ausgewogenes Eigenschaftsspektrum. So weisen die keramischen Konstruktionswerkstoffe zwar überwiegend einen höheren **Elastizitätsmodul**, eine höhere **Warmfestigkeit** und eine geringere **Dichte** auf, dafür aber unter Zugbeanspruchung eine geringere **Versagensspannung** als die metallischen Konstruktionswerkstoffe. Die polymeren Konstruktionswerkstoffe zeigen vielfach eine geringere Dichte, dafür aber auch einen geringeren Elastizitätsmodul, eine geringere Warmfestigkeit und unter Zugbeanspruchung wie auch unter Druckbeanspruchung eine geringere Versagensspannung als die metallischen Konstruktionswerkstoffe. Die **Risszähigkeit** der meisten metallischen Konstruktionswerkstoffe liegt sogar über der der keramischen und polymeren Konstruktionswerkstoffe. Insgesamt macht dies die weite Verbreitung der metallischen Konstruktionswerkstoffe in vielen Bereichen des täglichen Lebens verständlich.

Zur Ermittlung der Eigenschaften, die für die metallischen Konstruktionswerkstoffe relevant sind, zählt die Darstellung der strukturellen Eigenschaften sowie die Ermittlung der nichtmechanischen und der mechanischen Volumeneigenschaften der metallischen Konstruktionswerkstoffe (Tabelle 1.1); wegen der Abhängigkeit der korrosiven beziehungsweise tribologischen Eigenschaften des Systems Werkstoff/Umgebungsmedium beziehungsweise Werkstoff/Gegenkörper von den Bedingungen, die im konkreten Fall vorliegen, wird auf die Ermittlung dieser Eigenschaften nicht eingegangen.



**Bild 1.2 c** Temperaturabhängigkeit der Versagensspannung häufig verwendeter Konstruktionswerkstoffe nach Ashby<sup>1,1</sup>



---

## Weiterführende Literatur

- 1.1 Ashby, M.F.  
**Materials Selection in Mechanical Design**  
Butterworth-Heinemann, 2005

# 2

## Bindungsbasierende nicht-mechanische Eigenschaften

Zu den nichtmechanischen Eigenschaften einkomponentiger Werkstoffe, die auf der Stabilität der Bindungen zwischen ihren Atomen beruhen, zählen, wenn diese Werkstoffe im festen Zustand nur eine Kristallstruktur aufweisen, deren Verdampfungspunkt und Schmelzpunkt, spezifische Verdampfungswärme und spezifische Schmelzwärme, linearer Wärmeausdehnungskoeffizient und Wärmeleitfähigkeit. Nachfolgend werden Verfahren vorgestellt, die die Ermittlung dieser Kennwerte ermöglichen.

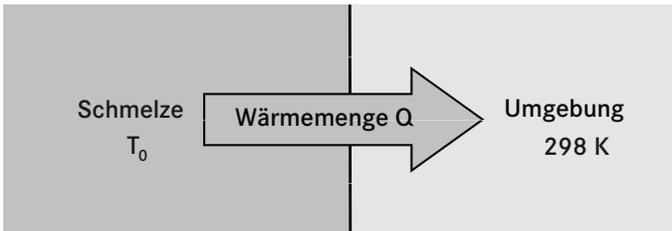
Die Ermittlung der Temperatur einer **Zustandsänderung** und der bei ihr freiwerdenden beziehungsweise zu ihrem Ablauf aufzuwendenden **spezifischen Wärmemenge** gelingt mit der **thermischen Analyse** der Zustandsänderung. Die in diesem Zusammenhang verwendeten Begriffe sind in der **DIN 51005** zusammengefasst.

### ■ 2.1 Zustandsänderungstemperaturen

Für jeden Werkstoff legt ein Satz von **Zustandsvariablen** einen Gleichgewichtszustand fest. Wie dieser **Gleichgewichtszustand** aussieht, kann experimentell ermittelt werden. Sind die Gleichgewichtszustände ermittelt, so lassen sie sich in Abhängigkeit von ihren Zustandsvariablen in einem **Gleichgewichtszustandsdiagramm** darstellen. Zur Aufstellung des Gleichgewichtszustandsdiagramms eines einkomponentigen Werkstoffs, der im festen Zustand nur eine Kristallstruktur aufweist, machen wir es uns zunutze, dass die Änderungen des Gleichgewichtszustandes, die bei Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr bei bestimmten Temperaturen stattfinden, mit **Wärmetönungen** verbunden sind. Wärmetönungen werden im Rahmen einer thermischen Analyse untersucht. Um die Zustandsänderungen, die bei Wärmezufuhr und Wärmeabfuhr stattfinden, dabei gleichgewichtsnah ermitteln zu können, ist eine **Aufwärmgeschwindigkeit** und **Abkühlgeschwindigkeit** von nicht mehr als 1 K/min bis 3 K/min erforderlich. Wird eine Probe, ausgehend von der Temperatur  $T_0$  ( $> 298$  K), bis auf 298 K abgekühlt, so ist ein Wärmestrom  $I_0$  aus der Probe in die kältere Umgebung zu verzeichnen, solange die aktuelle Temperatur  $T$  die Temperatur von 298 K noch nicht erreicht hat (*Bild 2.1*).

Der aktuelle Wärmestrom berechnet sich mit der Wärmemenge  $dQ$ , die in der inkrementell kurzen Zeit  $dt$  geflossen ist, zu

$$I_0 = \frac{dQ}{dt} \quad (2.1)$$



**Bild 2.1** Wärmefluss aus einer Probe in die kältere Umgebung

$I_Q$  ergibt sich mit der Wärmeübergangszahl  $a$  und der Oberfläche  $A$  der abkühlenden Probe sowie der Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ( $= 298 \text{ K} - T$ ) zwischen  $298 \text{ K}$  und der aktuellen Temperatur  $T$  zu

$$I_Q = -a \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.2)$$

Dabei berücksichtigt das negative Vorzeichen die Abkühlung ( $\Delta T < 0$ ). Die Wärmemenge  $dQ$ , die in der inkrementellen Temperaturspanne  $d(\Delta T)$  freigesetzt wird, berechnet sich mit der spezifischen Wärme  $c$  und der Masse  $m$  der abkühlenden Probe zu

$$dQ = c \cdot m \cdot d(\Delta T) \quad (2.3)$$

Für (2.1) folgt mit (2.2) und (2.3)

$$c \cdot m \cdot \frac{d(\Delta T)}{dt} = -a \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.4)$$

Mit  $K = (a \cdot A)/(c \cdot m)$  folgt aus (2.4)

$$\frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -K \cdot dt \quad (2.5)$$

Wird diese Beziehung mit  $\Delta T_0$  ( $= 298 \text{ K} - T_0$ ) integriert

$$\int_{\Delta T_0}^{\Delta T} \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -K \cdot \int_0^t dt \quad (2.6)$$

so folgt

$$\ln \Delta T - \ln \Delta T_0 = -K \cdot t \quad (2.7)$$

und damit über

$$\ln \frac{\Delta T}{\Delta T_0} = -K \cdot t \quad (2.8)$$

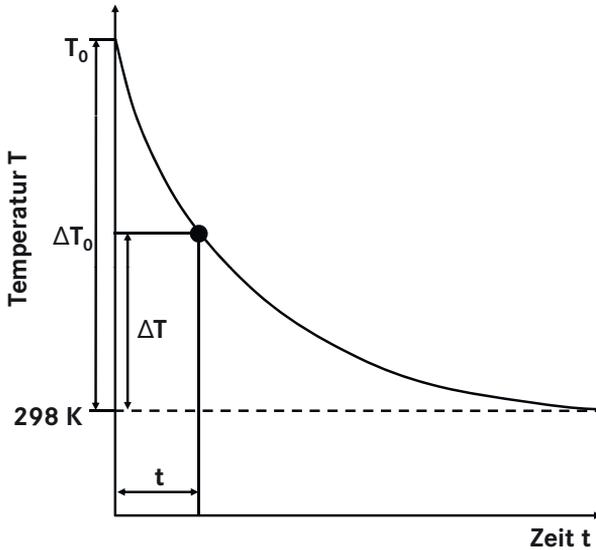
und

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = e^{-K \cdot t} \quad (2.9)$$

das **Newtonsche Abkühlungsgesetz**

$$\Delta T = \Delta T_0 \cdot e^{-K \cdot t} \quad (2.10)$$

Bild 2.2 zeigt eine T-t-Abhängigkeit, die sich aus dieser Beziehung ergibt.

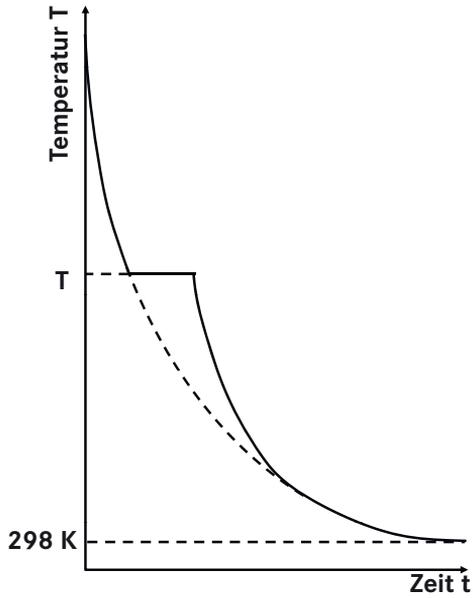


**Bild 2.2** Schematische Darstellung eines T-t-Verlaufes bei Abkühlung von  $T_0$  auf  $298 \text{ K}$

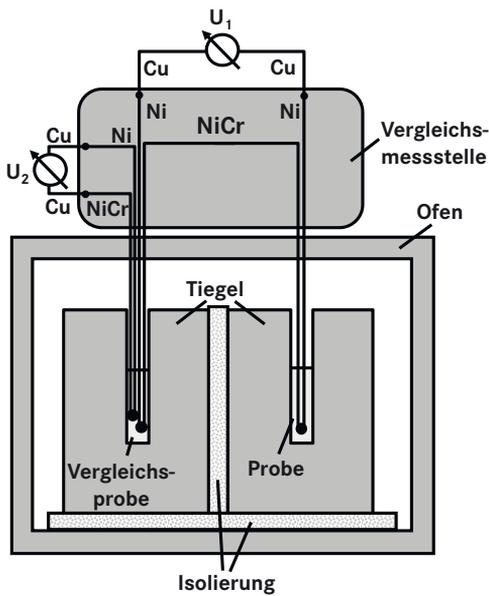
Laufen in einem System bei Abkühlung **exotherme Zustandsänderungen** ab, so führt dies zu Änderungen im Verlauf der Newtonschen Abkühlungskurve. Wir bezeichnen dies als eine Abkühlung mit **thermischem Effekt**. Wird die Umwandlungswärme bei einer festen Temperatur abgeführt, wie es beim Kondensieren und Erstarren eines einkomponentigen Werkstoffs der Fall ist, so verläuft die Abkühlungskurve bei dieser Temperatur so lange horizontal, bis das gesamte Probenvolumen die Umwandlung vollzogen hat. Die Abkühlungskurve weist einen sogenannten **Haltepunkt** auf (Bild 2.3). Die **Haltezeit** wird dabei von der Masse, der spezifischen Wärme, der Größe der Oberfläche, der Größe der Wärmeübergangszahl sowie der Wärmeleitfähigkeit der Probe und der Wärmeleitfähigkeit des Materials bestimmt, das die Probe umgibt. Ist die Umwandlung abgeschlossen, so nähert sich die Abkühlungskurve entsprechend einer Exponentialfunktion dem Newtonschen Verlauf.

### 2.1.1 Anordnung

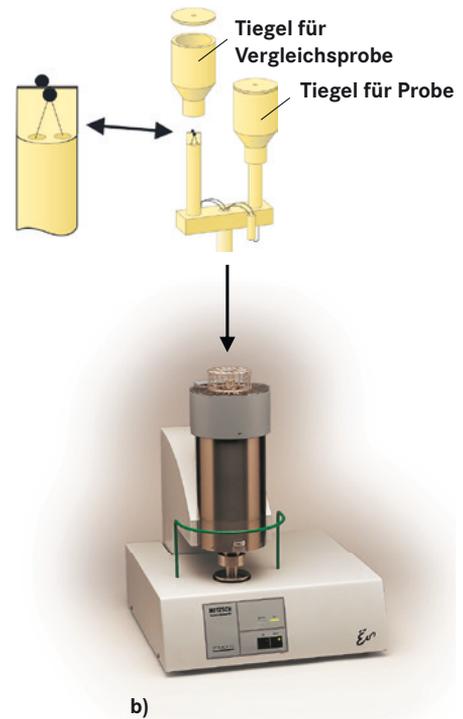
Damit Zustandsänderungen auch dann erfasst werden können, wenn sie nur geringe Wärmemengen frei setzen beziehungsweise wenn zu deren Ablauf nur geringe Wärmemengen aufzuwenden sind, wird neben der Probe gleichzeitig eine **Vergleichsprobe** untersucht. Probe und Vergleichsprobe sind der gleichen Ofentemperatur ausgesetzt und daher im Ofenraum dicht beieinander platziert (Bild 2.4).



**Bild 2.3** Abkühlkurve eines im Laufe der Abkühlung bei einer fixen Temperatur umwandlenden Metalls



a)



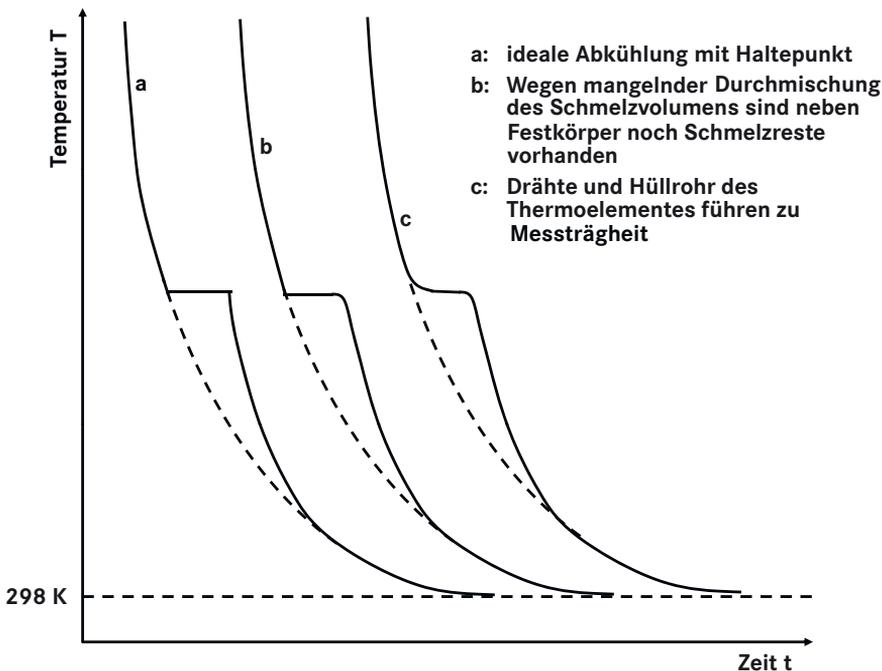
b)

**Bild 2.4** Anordnung zur Differenz-Thermoanalyse

a) schematisch

b) Apparatur (Foto: NETZSCH)

Dabei ist jedoch sicherzustellen, dass ein Wärmefluss zwischen Probe und Vergleichsprobe so weit wie möglich unterbunden wird. Die Vergleichsprobe muss zudem chemisch so beschaffen sein, dass sie im Temperaturintervall, das betrachtet wird, keine Wärmetönung zeigt und im Idealfall die gleiche Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit wie die eigentliche Probe aufweist. Gemessen wird nachfolgend die Differenz zwischen der Temperatur der Probe und der Temperatur der Vergleichsprobe, weswegen das Verfahren die Bezeichnung **Differenz-Thermoanalyse** trägt (engl.: differential thermal analysis). Zur Messung der Temperaturdifferenz zwischen der Probe und der Vergleichsprobe wird ein Differenz-Thermoelement verwendet, bei dem zwei artgleiche Thermoelemente gegeneinander geschaltet sind. Die Warmlötstelle des einen Thermoelementes ist in der Probe und die Warmlötstelle des anderen Thermoelementes in der Vergleichsprobe platziert. Die freien Schenkel der gegeneinander geschalteten Thermoelemente sind über Kaltlötstellen sowie Ausgleichsleitungen mit einem Spannungsmessgerät verbunden. Um das Auftreten einer Thermospannungsdifferenz der konkreten Temperatur zuordnen zu können, wird in der Vergleichsprobe die Warmlötstelle eines zweiten Thermoelementes platziert. Über Kaltlötstellen und Ausgleichsleitungen ist es an ein zweites Spannungsmessgerät angeschlossen, das die konkrete Temperatur erfasst. Um die Temperaturdifferenz und die konkrete Temperatur mit möglichst geringer zeitlicher Verfälschung messen zu können, sind die folgenden versuchstechnischen Gesichtspunkte zu beachten. Das Probenvolumen, das im Falle einer Erstarrung nach Erreichen der Erstarrungstemperatur nach einiger Zeit an der Tiegelwand erstarrt vorliegt, kühlt bereits weiter ab, während in der Tiegelmitte noch Rest-

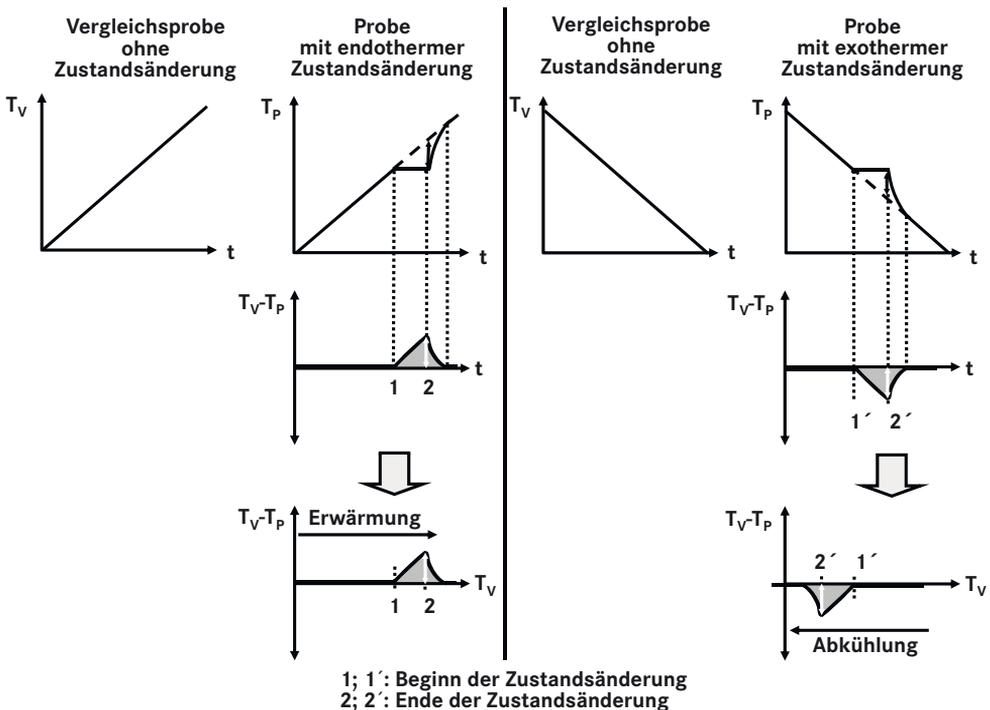


**Bild 2.5** Einflüsse der Versuchsführung (b, c) auf die ideale Abkühlkurve (a) eines bei Abkühlung auf Raumtemperatur bei einer fixen Temperatur erstarrenden Reinmetalls

schmelze vorliegt, die erst später in einer exothermen Reaktion erstarrt. Ist das untersuchte Werkstoffvolumen von vornherein groß, so verhindert dieser Effekt in der Abkühlkurve am Ende des Haltepunktes, der sich bei der Erstarrung eines einkomponentigen Werkstoffs bei der Erstarrung ausbildet, einen scharfen Knick (*Bild 2.5 b*). Um diesen Effekt zu minimieren, sollte das Probenvolumen möglichst klein gehalten werden. Der Durchmesser der Thermoelementdrähte sowie die Wanddicke und der Außendurchmesser eines möglicherweise verwendeten Thermoelementschutzrohres sollten so gering wie möglich sein. Die Drähte des Thermoelementes sowie dessen Schutzrohr weisen eine bestimmte Wärmekapazität auf, weswegen sie sich im Abkühlmodus stets auf einer höheren Temperatur als die Probe befinden. Dies führt dazu, dass das Thermoelement eine Temperatur oberhalb der real vorliegenden Temperatur anzeigt und verhindert in der Abkühlkurve zum Beispiel am Anfang des Haltepunktes, der sich bei der Erstarrung eines einkomponentigen Werkstoffs bei der Erstarrung ausbildet, einen scharfen Knick (*Bild 2.5 c*).

### 2.1.2 Durchführung

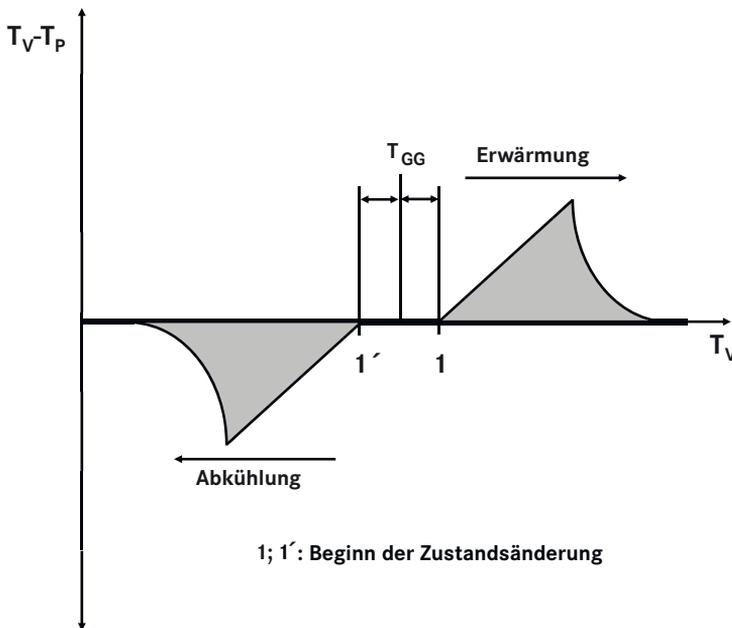
Die Ofentemperatur wird, ausgehend von 298 K, mit gleichgewichtsnaher Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Aufwärmmodus und nach Erreichen der angestrebten Maximaltemperatur mit gleicher Temperaturänderungsgeschwindigkeit im Abkühlmodus bis hinab auf 298 K verändert. Jedes der beiden Thermoelemente erzeugt in Abhängigkeit von



**Bild 2.6** Differenz-Thermoanalyse einer bei Erwärmung endotherm und bei Abkühlung exotherm reagierenden Probe

der Temperatur eine eigene Thermospannung, deren Differenz in Abhängigkeit von der Zeit aufgezeichnet wird. Sind die Probe und die Vergleichsprobe der gleichen Ofentemperatur ausgesetzt und ist bei dieser Temperatur bei der Probe keine **Wärmetönung** zu verzeichnen, so kompensieren sich die Thermospannungen der beiden Thermoelemente und zeigt das Spannungsmessgerät keine Differenzspannung an (Weist die Vergleichsprobe eine etwas andere Wärmekapazität und/oder Masse auf als die Probe, was fast stets der Fall ist, so zeigt sich auch ohne Zustandsänderung der Probe eine Differenzspannung, die als über die gesamte Messung hinweg konstant bleibende Grunddifferenzspannung zu verzeichnen ist). Zeigt die Probe im Zuge der Erwärmung und Abkühlung im Falle eines einkomponentigen Probenwerkstoffs bei einer bestimmten Temperatur eine Wärmetönung, so misst das in der Probe platzierte Thermoelement eine andere Temperatur als das in der Vergleichsprobe befindliche Thermoelement. Die sich einstellende **Thermospannungsdifferenz** wird erfasst. Wird von der Probe bei Aufwärmung infolge einer Zustandsänderung Wärme aufgenommen (endotherme Zustandsänderung) und bei Abkühlung wieder abgegeben (exotherme Zustandsänderung), so weisen die Spannungsdifferenzen, die sich ergeben, umgekehrte Vorzeichen auf (*Bild 2.6*).

Die Flächeninhalte unter den Kurven müssen dabei zudem entsprechend dem ersten Hauptsatz der Wärmelehre gleich groß sein: Die Energie, die beim Erwärmen vom System aufgenommen wird, wird beim Abkühlen wieder frei. Mit zunehmender Geschwindigkeit der Temperaturänderung kommt es zu einer **Umwandlungshysterese**. Für die Festlegung der **Gleichgewichtstemperatur** einer Zustandsänderung werden die Temperaturen herangezogen, bei denen die Phasenumwandlungen bei Erwärmung und bei Abkühlung einsetzen. Als Gleichgewichtstemperatur  $T_{GG}$  der Zustandsänderung ist dann das arithmetische Mittel aus diesen beiden Temperaturen anzugeben (*Bild 2.7*).



**Bild 2.7** Interpretation einer Differenz-Thermoanalyse mit Aufheizphase und Abkühlphase

### 2.1.3 Ergebnis

Mit der Aufnahme der Aufwärmkurve und der Abkühlungskurve und deren thermischer Analyse hinsichtlich der Temperaturen der Haltepunkte ist das **Gleichgewichtszustandsdiagramm** des einkomponentigen Werkstoffs experimentell ermittelt.

## ■ 2.2 Spezifische Umwandlungswärmen

Die Wärmemenge, die bei der Zustandsänderung von 1 Mol eines umwandelnden Stoffes freigesetzt wird beziehungsweise zur Zustandsänderung von 1 Mol des umwandelnden Stoffes aufzuwenden ist, bezeichnen wir als **spezifische Wärmemenge**. Die spezifische Kondensationswärme und die spezifische Verdampfungswärme eines einkomponentigen Werkstoffs entsprechen einander. Gleiches gilt für die spezifische Erstarrungswärme und die spezifische Schmelzwärme eines einkomponentigen Werkstoffs. Die Ermittlung dieser Wärmemengen gelingt mit der **Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie** (engl.: differential scanning calorimetry).

### 2.2.1 Anordnung

Nachdem die Masse der Probe und die Masse der Vergleichsprobe ermittelt worden sind, werden sie in Kapseln untergebracht, die die Wärme gut leiten und im interessierenden Temperaturbereich keine Phasenumwandlungen zeigen. Als **Vergleichsprobe** verwenden wir einen Stoff, der im zu untersuchenden Temperaturbereich keine Phasenumwandlungen zeigt. Die gekapselte Probe und Vergleichsprobe sind symmetrisch zur Ofenmitte auf einer Scheibe angeordnet, die gleichfalls aus einem gut Wärme leitenden Werkstoff besteht und die Wärme rasch von der Ofenwand zur gekapselten Probe und Vergleichsprobe fließen lässt (*Bild 2.8*).

Zeigt die Probe eine exotherme Zustandsänderung oder eine endotherme Zustandsänderung, so ermöglicht die Scheibe zusätzlich einen Wärmefluss von der Probe zur Vergleichsprobe (**exotherme Phasenumwandlung**) oder von der Vergleichsprobe zur Probe (**endotherme Phasenumwandlung**). Unmittelbar unter der Probe sowie der Vergleichsprobe sind artgleiche Thermoelemente platziert, die, wie bei der Differenz-Thermoanalyse, gegeneinander geschaltet sind. Die gemessene Spannungsdifferenz des Thermoelementpaares ist der Temperaturdifferenz von Probe und Referenzprobe proportional. Mit einem zweiten Thermoelement, das unter der Vergleichsprobe positioniert ist, wird deren Temperatur erfasst.

### 2.2.2 Durchführung

Der Ofen wird gleichgewichtsnah erwärmt (1 K/min bis 3 K/min). Als Folge fließt durch die Scheibe Wärme in die Probe und die Vergleichsprobe. Sind die Wärmekapazitäten von Probe und Vergleichsprobe identisch und spielt sich in der Probe keine **Zustandsänderung** ab, so sind die Wärmemengen, die von der Ofenwand durch die Scheibe zur Probe und Vergleichsprobe fließen, identisch. Die Temperaturdifferenz  $\Delta T$ , die zwischen der Pro-