



Leseprobe

Burkhard Heine

Werkstoffprüfung

Ermittlung der Eigenschaften metallischer Werkstoffe

ISBN (Buch): 978-3-446-44455-3

ISBN (E-Book): 978-3-446-44505-5

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44455-3>

sowie im Buchhandel.

# 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

<b>Vorwort</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>15</b>
Weiterführende Literatur.....	21
<b>2 Bindungsbasierende nichtmechanische Eigenschaften</b> .....	<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 Kristallgitter – Kristallstruktur</b> .....	<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

**4 Kristallstrukturbasierende nichtmechanische Eigenschaften 73**

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

**5 Kristallbaufehlerbasierende nichtmechanische Eigenschaften..... 77**

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	$\sigma_w$ - $\varepsilon_w$ -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	$\sigma$ - $\varepsilon$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	198
6.2.3.2	$\sigma_w$ - $\varepsilon$ -Kurve bei $T \leq 0,4 \cdot T_s$ .....	200
6.2.3.3	$\sigma_w$ - $\varepsilon$ -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

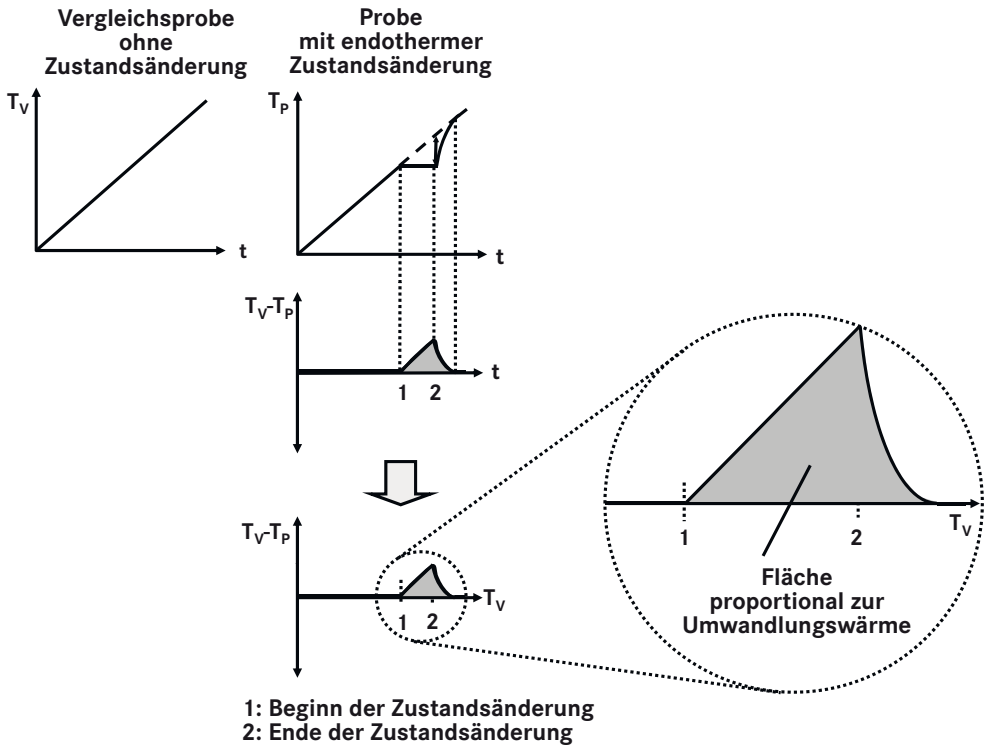


<b>8</b>	<b>Mechanische Eigenschaften rissfreier Proben bei dynamischer Beanspruchung.....</b>	<b>274</b>
8.1	Anordnung .....	274
8.2	Durchführung.....	275
8.2.1	Spannungskontrollierte Durchführung .....	279
8.2.2	Dehnungskontrollierte Durchführung .....	280
8.3	Ergebnis .....	286
8.3.1	Ergebnis einer 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	Druckeigenspannungen .....	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>



**Bild 2.9** Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie einer bei Erwärmung endotherm reagierenden Probe

änderung bleibt die Temperatur der Probe über die Umwandlungszeit hinweg konstant, zeigt sich also eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen Probe und Vergleichsprobe, die mit der Zeit immer größer wird. Da während dieser Zeit die Temperatur der Referenzprobe weiter der des Ofens folgt, nimmt die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  linear zu. Ist die Umwandlung abgeschlossen, so nähert sich die Proben temperatur entsprechend einer Exponentialfunktion der der Referenzprobe, geht die Temperaturdifferenz also exponentiell auf null zurück.

### 2.2.3 Ergebnis

Die Umwandlungswärme ist der Fläche unter der  $\Delta T$ - $T_V$ -Kurve proportional und kann nach einer Kalibrierung des Gerätes mit einer Substanz bekannter Umwandlungswärme quantifiziert werden.

## 2.3 Linearer Wärmeausdehnungskoeffizient

Die Grundlagen zur Ermittlung des **linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten** sind in der **DIN 51045-1** dargestellt. Bei einer Temperatur  $T_0$  habe ein Körper die Länge  $l_0$ .

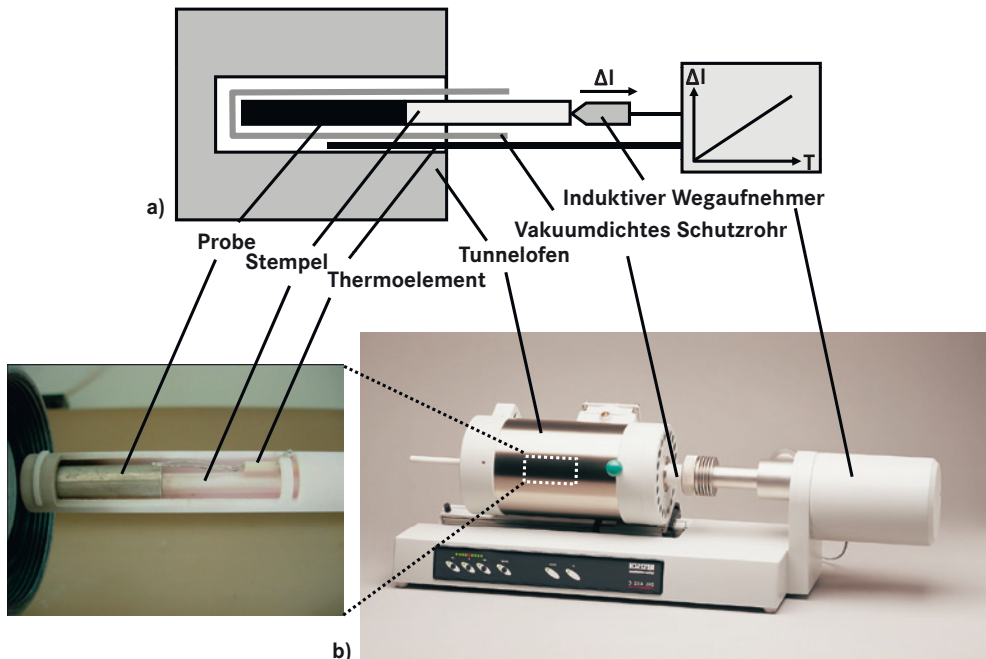
Der innerhalb des Temperaturintervalls  $\Delta T$  in erster Näherung gültige lineare Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$  ( $\alpha$  ist in Realität parabolisch von  $T$  abhängig) ergibt sich aus der Längenänderung  $\Delta l$ , die sich bei der Temperaturänderung  $\Delta T$  einstellt, zu

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad (2.11)$$

Wegen der parabolischen Abhängigkeit der Längenänderung  $\Delta l$  von der Temperaturänderung  $\Delta T$  ist die Genauigkeit des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten umso höher, je kleiner die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  ist. Der Wärmeausdehnungskoeffizient ist dann aber auch nur für den untersuchten Temperaturbereich gültig.

### 2.3.1 Anordnung und Durchführung

Die Ermittlung des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten gelingt mit einem **Dilatometer** (Bild 2.10). Dabei wird die thermisch induzierte Längenänderung einer prismatischen Probe erfasst. Um die Messung nicht durch die Oxidation der Probe zu verfälschen, ist die Probe in einem evakuierbaren Behälter platziert. Ein Keramikstempel, der durch eine vakuumdichte Durchführung hindurchführt und möglichst reibungsfrei gelagert ist,



**Bild 2.10** Darstellung eines Dilatometers

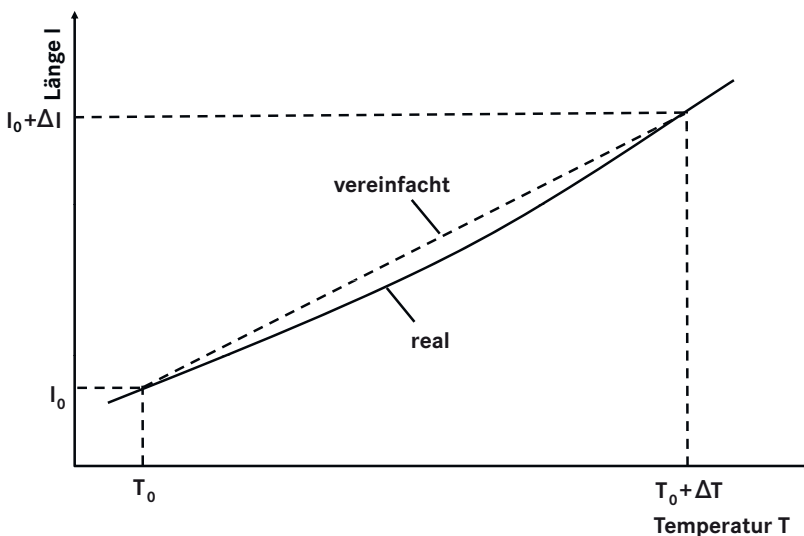
a) schematisch

b) Apparatur (Foto: NETZSCH)

reicht in den Ofen hinein und berührt das Ende der Probe. Der Stempel, der vor Beginn der Messung hinsichtlich seines eigenen Wärmeausdehnungsverhaltens vermessen wurde, überträgt den Längenzuwachs, der durch Erwärmung der Probe bei dieser zustande kommt, auf einen induktiven Wegaufnehmer. Der Längenzuwachs wird in Abhängigkeit von der Ofentemperatur erfasst.

### 2.3.2 Ergebnis

Bild 2.11 zeigt schematisch eine I-T-Auftragung, wie sie sich real ergibt. Der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha$ , der sich für den Temperaturbereich  $\Delta T$  ergibt, resultiert aus der Steigung der zugehörigen Sekante nach (2.11).



**Bild 2.11** Reale und in erster Näherung geltende Beziehung zwischen Probenlänge  $I$  und Temperatur  $T$

## ■ 2.4 Wärmeleitfähigkeit

Weist eine prismatische Probe über die Strecke  $d$  eine zeitlich konstante Temperaturdifferenz  $\Delta T (= T_2 - T_1)$  auf, so fließt durch die Querschnittsfläche  $A$  die Wärmemenge  $Q$  von der Region höherer zu der niedrigerer Temperatur. Diese Wärmemenge berechnet sich mit der **Wärmeleitfähigkeit**  $\lambda$  des wärmeleitenden Werkstoffs zu

$$Q = -\lambda \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{d} \quad (2.12)$$

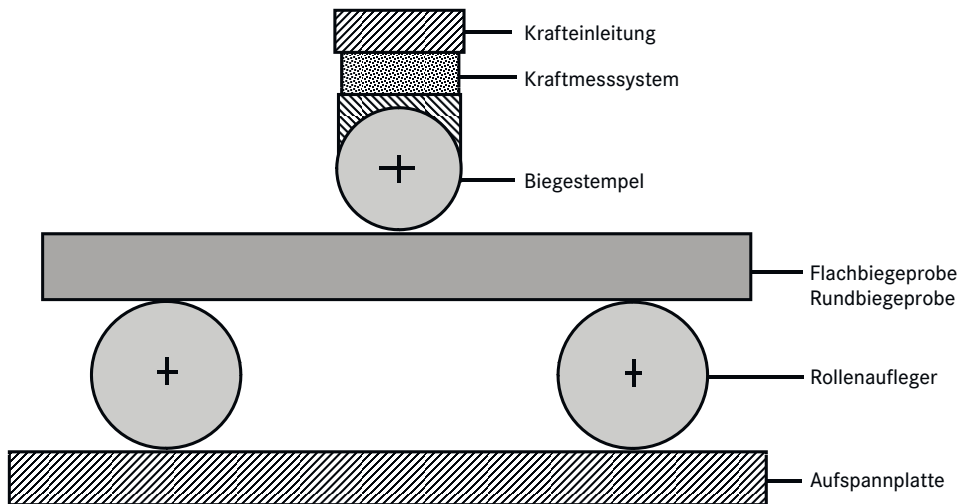
## ■ 6.4 Biegeversuch

Der Biegeversuch wird nach **DIN EN ISO 7438** als **Dreipunktbiegeversuch** durchgeführt und ist im Wesentlichen für harte und spröde Werkstoffe gedacht, da er bei weichen oder zähen Werkstoffen nicht zum Bruch führt. Er ermöglicht mit einfachen Mitteln die Ermittlung von Festigkeitskennwerten.

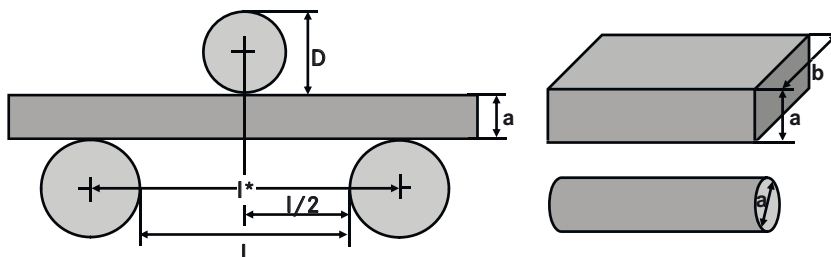
### 6.4.1 Anordnung

Die prinzipielle Anordnung ist *Bild 6.58* zu entnehmen.

Es werden **prismatische Proben** der Breite  $b$  und der Dicke  $a$  sowie zylindrische Proben mit dem Durchmesser  $a$  geprüft (*Bild 6.59*). Die Probenbreite  $b$  prismatischer Proben ist gleich der Erzeugnisbreite, wenn diese nicht mehr als 20 mm beträgt. Ist die Erzeugnisbreite größer als 20 mm, so soll die Probenbreite bei 20 mm liegen, wenn die Erzeugnisdi-



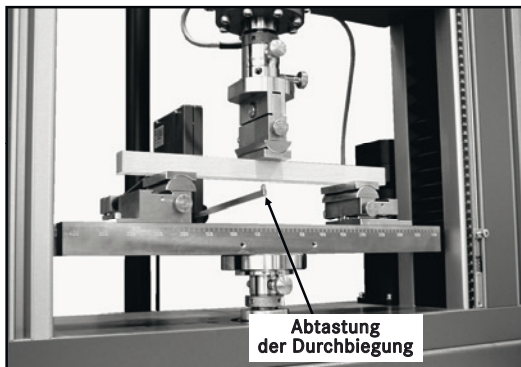
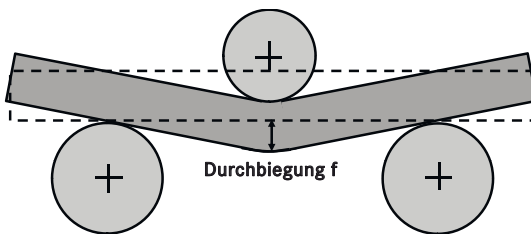
**Bild 6.58** Prinzipielle Anordnung beim Dreipunktbiegeversuch



**Bild 6.59** Biegeprobe

cke kleiner als 3 mm ist. Ist die Erzeugnisdicke größer als 3 mm, so soll die Probenbreite bei 20 mm bis 50 mm liegen. Die Probendicke  $a$  prismatischer Proben ist gleich der Erzeugnisdicke, wenn diese nicht mehr als 25 mm beträgt. Ist die Erzeugnisdicke größer als 25 mm, so soll sie auf 25 mm abgearbeitet werden und die unbearbeitete Probenfläche im Biegeversuch auf der zugbeanspruchten Seite liegen. Der Probendurchmesser  $a$  zylindrischer Proben ist gleich dem Erzeugnisdurchmesser, wenn dieser maximal 30 mm beträgt. Ist der Erzeugnisdurchmesser größer als 30 mm, so soll er auf 25 mm abgearbeitet werden.

Die Probe wird, wie in *Bild 6.59* und *Bild 6.60* dargestellt ist, so auf zwei zueinander parallel ausgerichtete und eine ausreichende Härte aufweisende **Rollenaufleger** gelegt, dass die Probenlängsachse und die Rollenlängsachse einen rechten Winkel bilden. In der Mitte zwischen den beiden Rollenauflegern ist ein ebenfalls ausreichende Härte aufweisender **Biegestempel** mit dem Durchmesser  $D$  angeordnet, der senkrecht zur Probenlängsachse verfahren werden kann und dadurch die Kraft  $F$  senkrecht zur Probenlängsachse in diese einleitet. Die Längsachse des Biegestempels ist parallel zur Längsachse der Rollenaufleger ausgerichtet. Der Abstand  $l$  der Rollenaufleger soll  $l = D + 3 \cdot a$  betragen. Die im Laufe des Versuchs zustande kommende **Durchbiegung**  $f$  der Probe wird mit einem **Messtaster** erfasst (*Bild 6.60*).



**Bild 6.60** Abtastung der Durchbiegung der Biegeprobe (Foto: ZWICK)

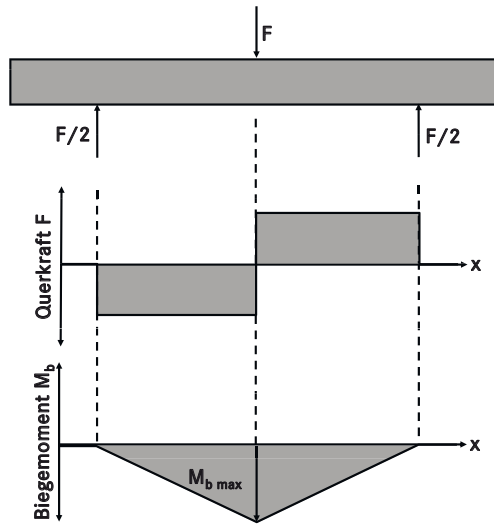
### 6.4.2 Durchführung

Eine Probe aus dem zu prüfenden Material wird in der Prüfmaschine einer langsam und stetig steigenden Beanspruchung in Gestalt einer konstanten Laststeigerungsgeschwindigkeit (**kraftgesteuerte Versuchsführung**) oder einer konstanten Dehngeschwindigkeit (**weggesteuerte Versuchsführung**) unterworfen. Aufgezeichnet wird die wirkende Kraft  $F$  in Abhängigkeit von der durch sie hervorgerufenen **Durchbiegung**  $f$ .



### 6.4.3 Ergebnis

Die Kennwerte des Biegeversuchs tragen als ersten Index alle ein „b“. Der Querkraftverlauf und Biegemomentenverlauf über die Biegestablänge kann mithilfe des Schnittprinzips ermittelt werden. Dazu werden die an der gedachten Schnittstelle vom gedanklich entfernten Stabteil übertragenen Querkraft und Biegemomente durch eine Querkraft und ein Biegemoment so ersetzt, dass das Kräftegleichgewicht und Momentengleichgewicht erhalten bleibt. In *Bild 6.61* ist der nach diesem Prinzip ermittelte **Querkraftverlauf** und **Biegemomentenverlauf** über die Probenlänge für den Fall der Dreipunktbiegung dargestellt.



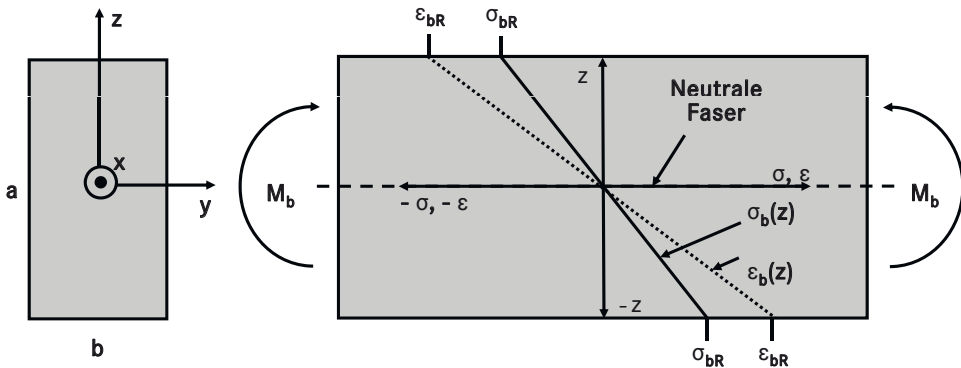
**Bild 6.61** Querkraftverlauf und Biegemomentenverlauf über die Probenlänge bei einem Dreipunktbiegeversuch

Infolge des zwischen den Rollenauglern in jedem Probenquerschnitt wirkenden Biegemomentes kommt es zu einer inhomogenen Spannungsverteilung und Dehnungsverteilung über den Probenquerschnitt: Bestimmte Querschnittsbereiche des Biegestabs werden infolge des wirkenden Biegemomentes auf Zug, andere auf Druck beansprucht. Die derart belasteten Querschnittsbereiche werden durch eine Probenschicht getrennt, in der weder Zugspannungen noch Druckspannungen auftreten. Sie wird als **neutrale Faser** bezeichnet. Sind die Fließkurven des Werkstoffs bei Zugbeanspruchung und Druckbeanspruchung symmetrisch, so sind auch die Spannungsverteilung und Dehnungsverteilung über den Querschnitt einer Biegeprobe bezüglich der neutralen Faser symmetrisch. *Bild 6.62* zeigt die Situation bei einer über den gesamten Querschnitt elastischen Verformung.

Maximal ist das **Biegemoment**  $M_b$  infolge des dort angreifenden Biegestempels in der Mitte des Biegebalkens. Es berechnet sich zu

$$M_{b,\max} = \frac{F \cdot l^*}{4} \quad (6.124)$$

Mit diesem maximalen Biegemoment und dem Flächenträgheitsmoment  $I$  ( $I = (b \cdot a^3)/12$  für Rechteckquerschnitte und  $I = (\pi \cdot d^4)/64$  für Kreisquerschnitte) berechnet sich die Normalspannung  $\sigma_b(z)$ , die in der Wirkebene des belastenden Biegestempels im Abstand  $z$  von



**Bild 6.62** Spannungsverteilung und Dehnungsverteilung im Querschnitt eines elastisch beanspruchten Biegebalkens bei symmetrischen Fließkurven des Werkstoffs im Zugversuch und Druckversuch

der neutralen Faser im Falle einer über den gesamten Probenquerschnitt rein elastischen Verformung wirkt, zu

$$\sigma_b(z) = \pm \frac{M_{b,\max}}{I} \cdot z = \pm \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \cdot z \quad (6.125)$$

Die Dehnung  $\varepsilon_b(z)$  im Abstand  $z$  von der neutralen Faser lässt sich unter Verwendung des **Hookeschen Gesetzes** ( $\sigma_b = E \cdot \varepsilon_b$ ) mit dem **Elastizitätsmodul**  $E$  berechnen zu

$$\varepsilon_b(z) = \pm \frac{\sigma_b(z)}{E} = \pm \frac{1}{E} \cdot \frac{M_{b,\max}}{I} \cdot z = \pm \frac{1}{E} \cdot \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \cdot z \quad (6.126)$$

Die maximale Durchbiegung  $f$  steht über den Elastizitätsmodul  $E$  mit der Stützweite  $l^*$  und dem Flächenträgheitsmoment  $I$  wie folgt in Verbindung:

$$f = \frac{1}{E} \cdot \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \cdot \frac{(l^*)^2}{12} \quad (6.127)$$

Anhand dieser Beziehung lässt sich der Elastizitätsmodul  $E$ , basierend auf den gemessenen Werten für die Kraft  $F$  und der zugehörigen maximalen Durchbiegung  $f$ , berechnen, denn eine Umformung liefert

$$E = \frac{F \cdot (l^*)^3}{48 \cdot f \cdot I} \quad (6.128)$$

Diesen Weg zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls beschreitet man gerne bei der Untersuchung harter und spröder Werkstoffe, die im Zugversuch kaum versagensfrei eingespannt werden können. Wird (6.127) umgeformt zu

$$\frac{12 \cdot f}{(l^*)^2} = \frac{1}{E} \cdot \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \quad (6.129)$$

und wird (6.129) in (6.126) eingesetzt, so ergibt sich

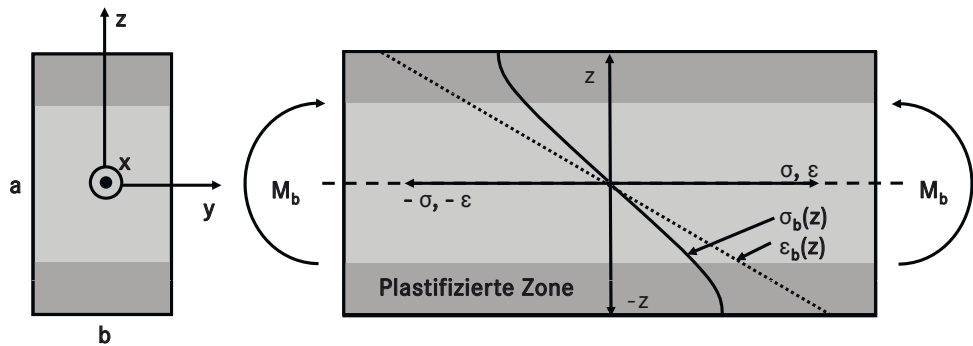
$$\varepsilon_b(z) = \pm \frac{12 \cdot f}{(l^*)^2} \cdot z \quad (6.130)$$

Die Gleichungen (6.125) und (6.130) zeigen, dass  $\sigma_b(z)$  und  $\varepsilon_b(z)$ , wie zuvor der Elastizitätsmodul, unmittelbar aus den gemessenen Werten für die Kraft  $F$  und der zugehörigen maximalen Durchbiegung  $f$  berechnet werden können. Daneben bilden die genannten Gleichungen die Basis für die in *Bild 6.62* kennengelernten linearen  $z$ -Abhängigkeiten von  $\sigma_b(z)$  und  $\varepsilon_b(z)$ . In den Randfasern der Probe, bei  $z = \pm a/2$  also, treten die größten Spannungen und Dehnungen auf. Die Biegerandspannung  $\sigma_{bR}$  und die Biegeranddehnung  $\varepsilon_{bR}$  lassen sich berechnen zu

$$\sigma_{bR} = \pm \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \cdot \frac{a}{2} \quad (6.131)$$

$$\varepsilon_{bR} = \pm \frac{1}{E} \cdot \frac{F \cdot l^*}{4 \cdot I} \cdot \frac{a}{2} \quad (6.132)$$

Wird die Kraft  $F$  und damit das Biegemoment  $M_{b,max}$  so weit gesteigert, dass die Biegerandspannung  $\sigma_{bR}$  die **Biegefließgrenze**  $\sigma_{bF}$  überschreitet, so liegt bis in eine Tiefe, bis zu der dies gleichfalls der Fall ist, ein elastisch/plastischer Verformungszustand vor (*Bild 6.63*). Dadurch setzt sich bis in eben diese Tiefe die Dehnung  $\varepsilon_b$  aus einem elastischen und einem plastischen Teil zusammen. Die lineare Abhängigkeit für  $\varepsilon_b$  von der Höhe der Biegeprobe bleibt dabei erhalten. Für die Normalspannung gilt dies aber nicht mehr. Sie stellt sich entsprechend dem Wechselspiel aus metallphysikalischer Verfestigung und geometrischer sowie metallphysikalischer Entfestigung in der Probe ein.

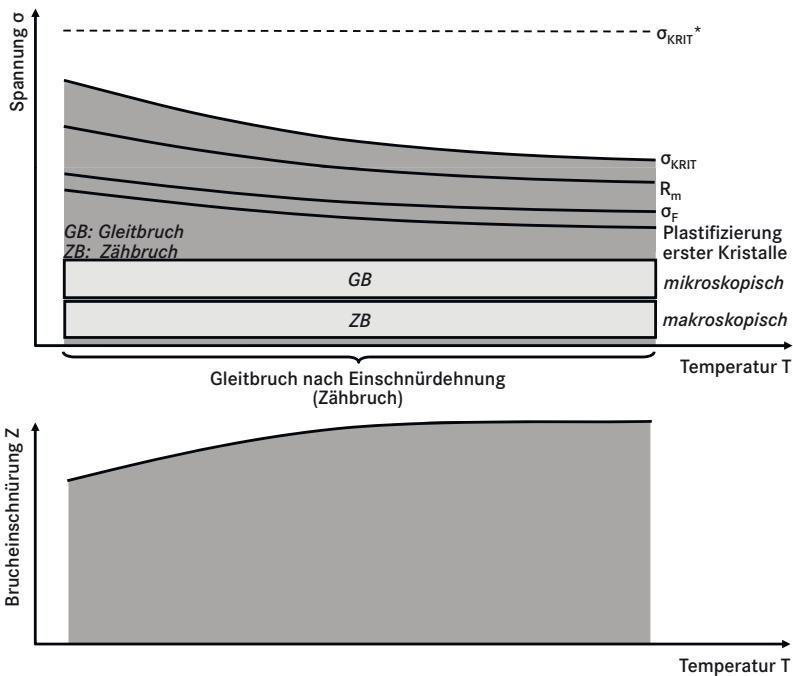


**Bild 6.63** Spannungsverteilung und Dehnungsverteilung im Querschnitt eines elastisch/plastisch beanspruchten Biegebalkens

Um aber auch weiterhin mit der vergleichsweise einfachen Beziehung (6.131) rechnen zu können, nimmt man eine auch jetzt noch über den gesamten Querschnitt lineare Normalspannungsverteilung an, die am Rand der Biegeprobe zu der anhand von (6.131) berechneten fiktiven Biegerandspannung  $\sigma_{bR}'$  führt. *Bild 6.64* zeigt im Vergleich die tatsächlich wirksame Normalspannung und die fiktive Spannungsverteilung: Die wahre Spannung ist im Bereich der elastisch/plastischen Verformung zunächst kleiner als die fiktive Spannung. Weiter innen liegt die wahre Spannung höher.

### 9.1.5.3 Proben eines kubisch-flächenzentriert vorliegenden Werkstoffs

Kubisch-flächenzentriert vorliegende polykristalline Werkstoffe weisen eine hohe Zahl von Gleitsystemen auf (Erfüllung der *von Mises*-Bedingung für Plastifizierung von Polykristallen [mindestens 5 Gleitsysteme]), bei denen die Gleitebenen und Gleitrichtungen dichtest gepackt sind. Eine Aktivierung der plastischen Verformbarkeit in Gestalt der Fließgrenze  $\sigma_F$  durch thermische Aktivierung zeigt daher hier nur noch wenig Wirkung: Die Fließgrenze  $\sigma_F$ , Zugfestigkeit  $R_m$  und Bruchspannung  $\sigma_{KRIT}$  sind nur wenig temperaturabhängig und liegen über den ganzen technisch genutzten Temperaturbereich unterhalb der mikroskopischen Spaltbruchspannung  $\sigma_{KRIT}^*$  (Bild 9.33). Bei niedrigsten kubisch-flächenzentriert vorliegenden Werkstoffen kommt es daher bei diesen Temperaturen bei glatten wie ange-rissenen Proben zu einem **Zähbruch**, d. h. zu einer deutlichen **Bruchdehnung**.



**Bild 9.33** Temperaturabhängigkeit der Fließgrenze  $\sigma_F$ , Zugfestigkeit  $R_m$ , Bruchspannung  $\sigma_{KRIT}$  und mikroskopischen Spaltbruchspannung  $\sigma_{KRIT}^*$  sowie der Bruchdehnung  $Z$  einer glatten Zugprobe aus einem kubisch-flächenzentriert vorliegenden Werkstoff

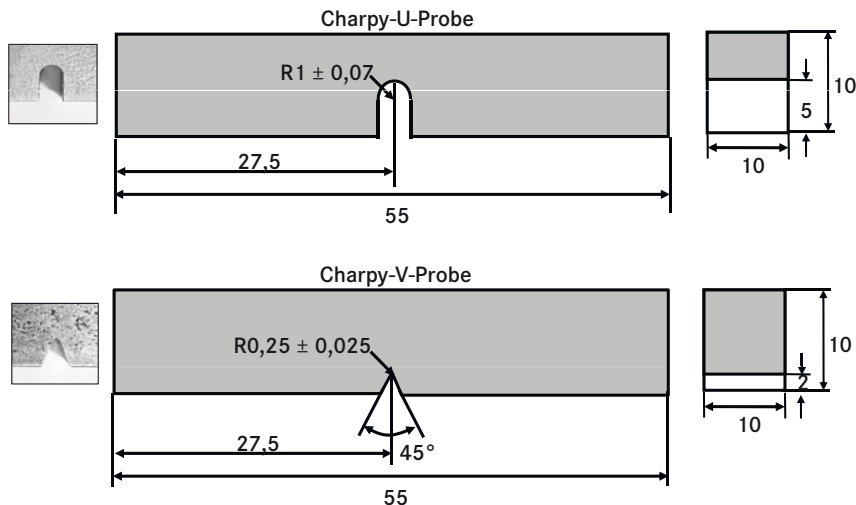
## 9.2 Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch ist wegen seiner kostengünstigen Probenfertigung und der einfachen Versuchsdurchführung das am häufigsten angewendete Verfahren zur Ermittlung der Werkstoffzähigkeit und somit zur qualitativen Beurteilung der Bauteilsicherheit beim Vorliegen eines sprödebruchbegünstigenden Spannungszustandes sowie einer spröde-

bruchbegünstigenden Verformungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Von Nachteil ist, dass die ermittelten Kennwerte **geometrieabhängig** sind und nur qualitativ auf Bauteile desselben Werkstoffs übertragen werden können, einen Vergleich verschiedener Werkstoffe untereinander aber zulassen. Zu beachten ist, dass das Einbringen eines Kerbs der nachfolgend vorgestellten Schärfe keinen Rückschluss auf die Belastbarkeitsuntergrenze einer Probe zulässt, die angerissen ist.

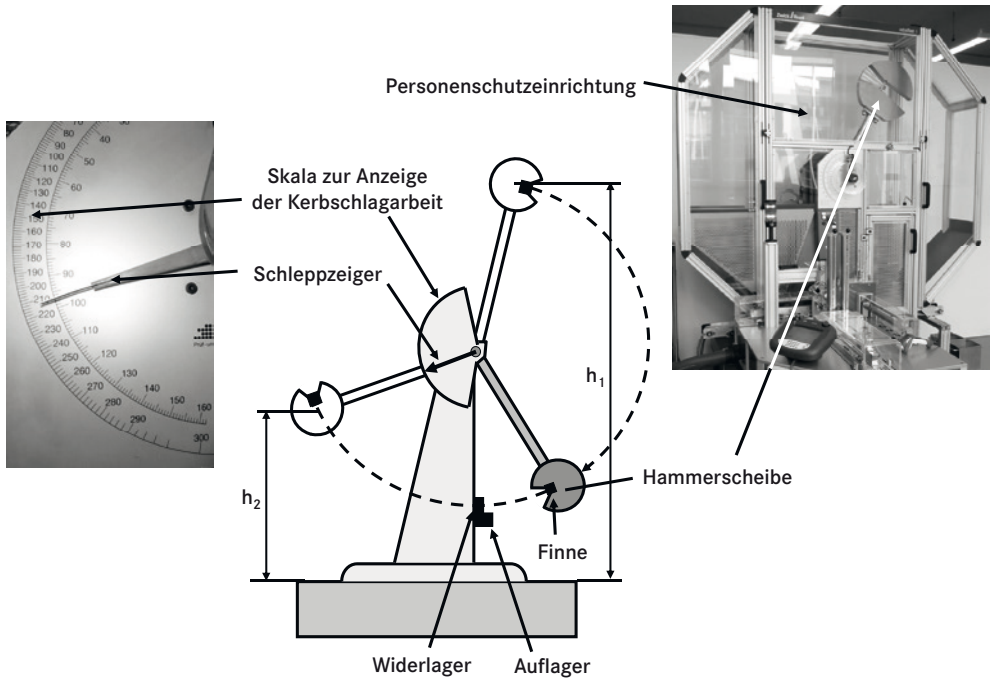
### 9.2.1 Anordnung

Zur Verschärfung des Spannungszustandes macht man Versuche mit gekerbten Proben. Der in der **DIN EN ISO 148-1** sowie der **DIN 50115** beschriebene Kerbschlagbiegeversuch nach *Charpy* verwendet die in *Bild 9.34* dargestellte Probenform, die mit einem **Rundkerb** oder mit einem **Spitzkerb** versehen ist.



**Bild 9.34** Probengeometrien nach Charpy

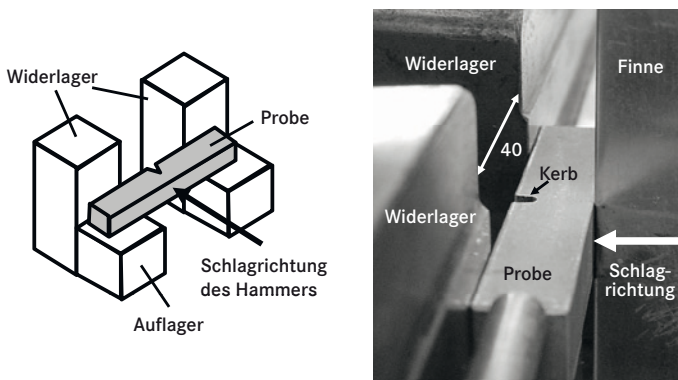
Die Normprobe ist 55 mm lang und hat einen quadratischen Querschnitt von 10 mm Kantenlänge. Bei Blechdicken unter 10 mm sind auch Untermaße möglich. Die Kerbe wird in der Mitte der Probe senkrecht zur Probenlängsachse spanabhebend eingearbeitet. Bei Blechdicken unter 10 mm darf auch die Kerbtiefe Untermaße aufweisen. Die Probengeometrie wird für eine Versuchsreihe konstant gehalten. Variiert wird dagegen von Versuch zu Versuch die Probentemperatur, wobei bei jeder Temperatur mehrere Proben geprüft werden sollten. Bei von Raumtemperatur abweichenden Prüftemperaturen wird die Probe so lange in einem Medium entsprechender Zieltemperatur gelagert, bis die angestrebte Temperatur über den gesamten Probenquerschnitt erreicht ist. Zum Aufbringen einer hohen Verformungsgeschwindigkeit verwendet man einen **Pendelhammer**, dessen Arbeitsvermögen unter Normbedingungen bei 300 J (es sind aber auch Maschinen mit einem davon abweichenden Arbeitsvermögen zulässig) und dessen Auftreffgeschwindigkeit auf die Probe bei 5,0 m/s bis 5,5 m/s liegt (*Bild 9.35*).



**Bild 9.35** Anordnung beim Kerbschlagbiegeversuch

## 9.2.2 Durchführung

Zur Prüfung wird die Probe, wie in *Bild 9.36* dargestellt, so auf zwei Auflagern gegen zwei Widerlager gelegt, die beide einen lichten Abstand von 40 mm aufweisen, dass die Kerbe zur Widerlagerseite weist. Dadurch liegt sie beim nachfolgenden Biegeschlag auf der Zugseite der Kerbschlagbiegeprobe.



**Bild 9.36** Zur Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs

Zum Versuch fällt der Pendelhammer von der Ausgangshöhe  $h_1$  (*Bild 9.35*), eine Kreisbahn beschreibend, herab und trifft auf die im tiefsten Punkt seiner Kreisbahn angeordnete Probe so, dass die Hammerfinne in Kerbebene auf der der Kerbe gegenüberliegenden Seite der Probe auftrifft. Dadurch wird die Probe verformt und in der Regel auch zerbrochen. Nach dem Verformen und Zerbrechen der Probe steigt der Pendelhammer auf die von einem **Schleppzeiger** festgehaltene Höhe  $h_2$ . Die Differenz zwischen Höhe  $h_1$  und Höhe  $h_2$  ist ein Maß für die verbrauchte Arbeit, die als **Kerbschlagarbeit**  $K$  bezeichnet wird. Sie berechnet sich mit der Höhe  $h_1$  und der Höhe  $h_2$  sowie der Masse  $m_p$  des Pendelhammers zu

$$K = m_p \cdot g \cdot (h_1 - h_2) \quad (9.34)$$

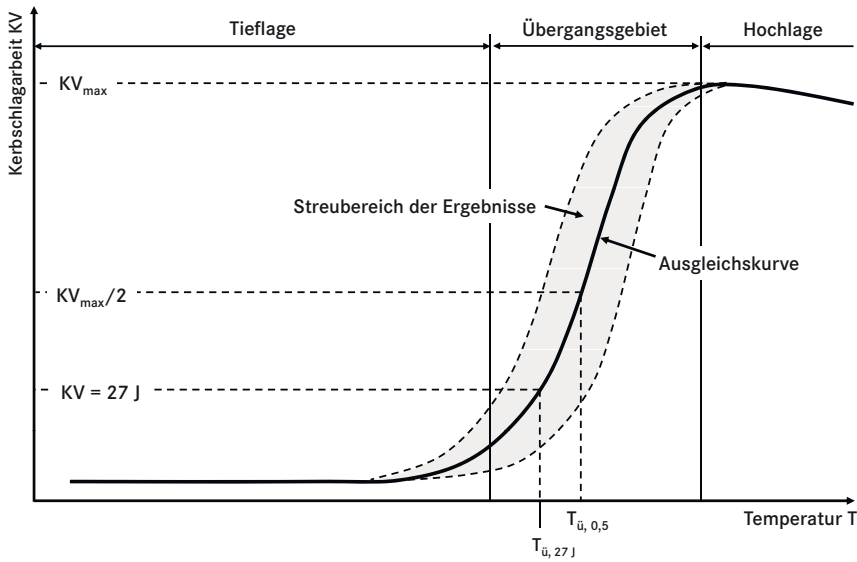
und wird vom Schleppzeiger auf einer Skala angezeigt. Sie setzt sich zusammen aus der zur elastischen und plastischen Verformung, zum Risswachstum sowie zur Beschleunigung der Bruchstücke erforderlichen Arbeit. Wird eine Probe im Kerbschlagbiegeversuch nur verformt, nicht aber gebrochen, so kann die zum Bruch aufzuwendende **Schlagarbeit** nicht ermittelt werden. Die Angabe der Kerbschlagarbeit  $K$  [J] (im nachfolgenden Beispiel 129 J) erfolgt unter Vermerk der verwendeten Kerbgeometrie (U für den normentsprechenden U-Kerb und V für den normentsprechenden V-Kerb) und, wenn sie von der Norm abweicht, des Arbeitsvermögens (im nachfolgenden Beispiel 100 J) des Pendelhammer, so zum Beispiel  $KU 100 = 129 \text{ J}$ .

### 9.2.3 Ergebnis

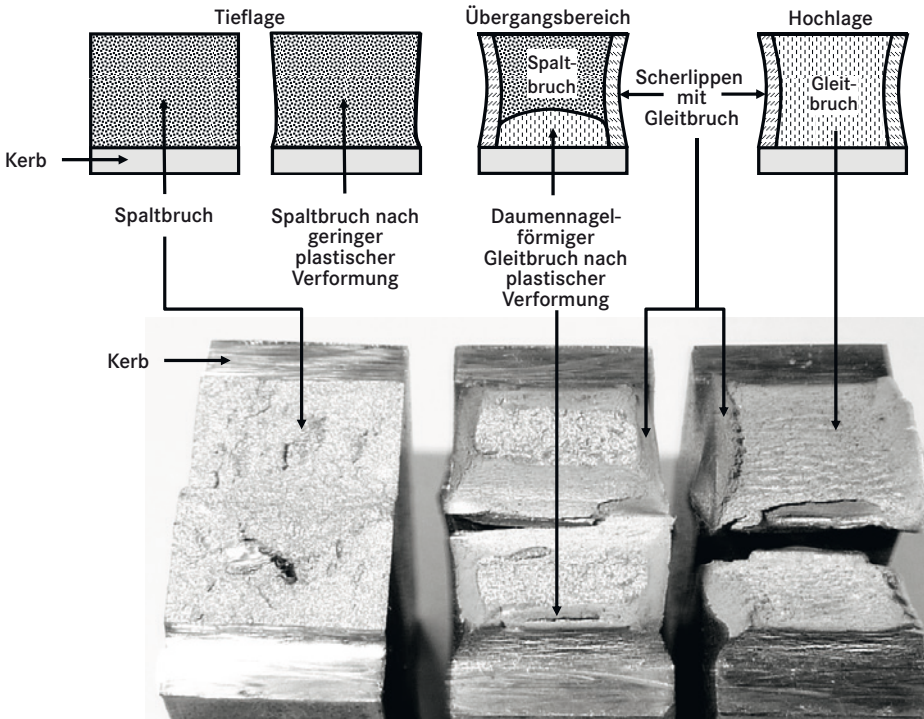
Bei den Werkstoffen, die in einem werkstoffspezifischen Temperaturbereich einen Übergang vom zähen zum spröden Bruchverhalten aufweisen, ergibt sich in Abhängigkeit von der Temperatur ein S-förmiger Verlauf der **Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve** (*Bild 9.37*). Dabei zeigt sich besonders im Übergangsbereich eine starke Streuung der Werte, verursacht durch ortsabhängige Unterschiede im Gefüge. Durch die Messpunkte wird eine **Ausgleichskurve** gelegt.

Neben der Ermittlung der für den Probenbruch aufzuwendenden Kerbschlagarbeit erfolgt eine makroskopische Bewertung des Erscheinungsbildes der Bruchfläche, so zum Beispiel die Ermittlung des prozentualen Gleitbruchanteils an der Gesamtbruchfläche nach Bruchbild-Richtreihen entsprechend der **ASTM A 370-10** (*Bild 9.38*). In der **Tieflage** erfolgt der Bruch als reiner **Spaltbruch** ohne (sehr tiefe Temperatur) oder nach nur geringer plastischer Verformung (tiefe Temperatur). Im **Übergangsbereich** (vergleichbar mit Temperaturbereich IV in *Bild 9.31*) bildet sich an der Spitze der plastisch verformten Zone daumennagelförmig ein Gleitbruch aus, der nach einer gewissen Phase des Wachstums in einen spaltbrüchigen Restbruch übergeht (**Mischbruch**). Mit steigender Temperatur vergrößern sich die plastisch verformte Zone sowie der Gleitbruchanteil und verringert sich die Fläche des spaltbrüchigen Restbruchs. In der **Hochlage** schließlich erfolgt der Bruch nach plastischer Verformung vollständig durch **Gleitbruch**.

Neben der Ermittlung der für den Probenbruch aufzuwendenden Kerbschlagarbeit erfolgt eine Bewertung des plastischen Verformungsgrades in Form der **seitlichen Breitung** (*Bild 9.39*).



**Bild 9.37** S-förmiger Verlauf der Kerbschlagarbeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei kubisch-raumzentriert und hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffen



**Bild 9.38** Bruchmorphologie in Abhängigkeit von der Prüftemperatur



# Index

## Symbole

0,2 %-Dehngrenze *154, 158*  
3-Punkt-Biegeprobe *356, 365, 373, 375*

## A

Abbildungstreuung *96*  
Abkühlgeschwindigkeit *22*  
Abrastern *118*  
Absorption *129*  
AES *78, 79*  
Akkommodationsprozesse *268*  
Aktivierungsenergie *171, 173*  
Alterung *160*  
Analysatorkristall *87*  
Analyse, thermische *22*  
Anisotrop *60, 110*  
Anisotropie, ebene *189*  
Anisotropie, senkrechte *188*  
Ankopplungsmedium *133*  
Anode *43*  
Anregung *78*  
Anrisskennlinie *286, 288*  
Anrisschwingspielzahl *279, 283*  
Anzeigecontrast *147*  
Apertur *102*  
Archimedes *73*  
ASTM A 370-10 *344*  
ASTM E 399-08 *356, 358, 359, 364*  
ASTM E 647-08 *384, 386*  
ASTM E 1820-09 *373, 375, 377*  
Atomemissionsspektroskopie *78*  
Ätzen *96*  
Auflichtmikroskop *91, 96, 101*  
Auflösung *84, 85, 116, 117*  
Auftriebsprinzip *73*  
Aufwärmgeschwindigkeit *22*  
Auslöschung *53*

## B

Baumannhammer *246*  
Bauteiloberfläche *92*  
Belastungs-Entlastungs-Hysterese *158*  
Belichtungszeit *121*

Berkovichpyramide *238*  
Beschleunigungsspannung *43, 45*  
Beugungsbildmodus *62*  
Beugungsgitter *80*  
Beugungskegel *66*  
Beugungsreflex *52, 55*  
Biegedehngrenze *216*  
Biegefestigkeit *216*  
Biegefließgrenze *214, 216*  
Biegekraft *348*  
Biegemoment *212*  
Biegemomentenverlauf *212*  
Biegeproben *350*  
Biegerandspannungs-Biegeranddehnungs-Kurve *216*  
Bildauswertung *147*  
Bildgütezahl *122*  
Blausprödigkeit *306*  
Blunting line *377*  
Bollmannverfahren *62*  
Braggsche Reflexionsbedingung *51, 55, 56, 66, 69, 70, 80, 82, 87, 111, 113*  
Brechungsgesetz *130*  
Brinell *221*  
Bruch *161, 217, 259, 274, 283, 310, 313*  
Bruchanalyse-Diagramm *351*  
Bruchausbauchung *200*  
Bruchbahnen *284*  
Bruchdehnung *151, 162, 338, 340, 341*  
Brucheinschnürung *162*  
Bruchfläche *89, 90, 114, 207, 336*  
Bruchkennlinie *286, 288*  
Bruchschwingspielzahl *279, 283, 287, 288, 290, 291*  
Bruchspannungen, theoretische *313*  
Bruchstauchung *199*  
Bruchverlaufslinien *284*  
Bruchwahrscheinlichkeit *293*  
Bruchzähigkeit *320*  
Bruchzeit *259*

## C

Chemische Zusammensetzung *77*  
Clip-gauge *359, 365, 375*  
Comptoneffekt *123, 124*  
Considère-Kriterium *168*  
Cottrellwolken *160*  
Crack-Arrest-Temperature-Kurve *353*

Crack tip opening displacement 364

## D

da/dN- $\Delta$ K-Abhängigkeit 387  
 Daueranriss 284  
 Dauerbruch 287  
 Dauerfestigkeit 287, 302, 383  
 Dauerfestigkeitsschaubild 300, 301  
 Dauerschwinganriss 284  
 Dauerschwingbruch 274  
 Dauerschwingversuch 274  
 Debye-Scherrer-Kreis 70  
 Dehngrenze 207, 334  
 Dehnung, elastische 156  
 Dehnung, plastische 157, 160  
 Dehnung, scheinbare 156, 259  
 Dehnungszustand, ebener 314, 328, 329, 367, 377  
 Dehnung, wahre 162  
 Diamantpyramide 229  
 Dichte 15, 18, 73, 128, 129, 193  
 Dichte, theoretische 73  
 Differenz-Thermoanalyse 26  
 Diffraktometer 57  
 Diffusionskriechen 268  
 Dilatometer 32  
 DIN 50100 274  
 DIN 50106 193  
 DIN 50113 274  
 DIN 50115 342  
 DIN 50125 151  
 DIN 50142 274  
 DIN 50156-1 249  
 DIN 51005 22  
 DIN 51045-1 31  
 DIN 54190 145  
 DIN EN 462 120  
 DIN EN 571 146  
 DIN EN 583 133  
 DIN EN 1330 119  
 DIN EN 1669 189  
 DIN EN 10274 352  
 DIN EN 10291 256  
 DIN EN 12084 139  
 DIN EN ISO 148-1 342  
 DIN EN ISO 4545-1 229  
 DIN EN ISO 4545-4 229  
 DIN EN ISO 6506-1 221  
 DIN EN ISO 6506-4 221  
 DIN EN ISO 6507-1 224  
 DIN EN ISO 6507-4 224  
 DIN EN ISO 6508-1 231  
 DIN EN ISO 6892-1 150, 153  
 DIN EN ISO 6892-2 150, 153, 154  
 DIN EN ISO 7438 210  
 DIN EN ISO 9934 141  
 DIN EN ISO 12737 365, 391  
 DIN EN ISO 14556 347

DIN EN ISO 14577-1 238  
 DIN EN ISO 18265 237, 254  
 DIN ISO 10113 188  
 Doppelstrahldünnen 62  
 Drehkristallverfahren 57  
 Dreipunktbiegeversuch 210  
 Druckbeanspruchung 193  
 Druckfestigkeit 200  
 Druckprobe 196  
 Druckschwellbeanspruchung 274  
 Druckspannung, scheinbare 198  
 Druckspannung, wahre 200  
 Dunkelfeld 104, 111, 113  
 Dünnen 61  
 Durchbiegung 211, 375  
 Durchläufer 295  
 Durchleuchtungsverfahren 122  
 Durchplastifizierung 340  
 Durchschallungsverfahren 133

## E

EDX 84  
 Effekt, direkter piezoelektrischer 127  
 Effekt, inverser piezoelektrischer 127  
 Einbetten 93  
 Eindringhärteprüfung, instrumentierte 156, 238  
 Eindringhärteprüfverfahren 218  
 Eindringmodul, elastischer 244  
 Eindringtiefe 241  
 Eindringtiefe, bleibende 234  
 Einkristall 55, 57  
 Einprobenmethode 370, 379  
 Einschallwinkel 131, 135  
 Einschlüsse 333  
 Einschlüsse, nichtmetallische 95  
 Einschnürdehnung 161  
 Elastizitätsmodul 17, 18, 128, 129, 154, 156, 191, 193,  
 213, 244, 320, 325  
 Elektronenkollektor 118  
 Elektronenloch 45, 77  
 Elektronenmikroskop 90  
 Elektronenpaarbildungseffekt 124  
 Elektronenstrahlmikroanalyse 78  
 Elektronenstrahlung 61, 65  
 Elektronenstrahlung, Monochromatische 43  
 Elektronen, transmittierte 44  
 Elektrostriktion 127  
 Elementarzelle 36  
 element mapping 86  
 Energiebänder 47, 78  
 Energie, elastische 319  
 Energiefreisetzungsrates, kritische 321, 356  
 Energieniveaus, diskrete 77  
 Entfestigung 201, 255, 259  
 Entfestigung, geometrische 165, 166, 255  
 Ermüdung, thermische 280  
 ESMA 78, 81

Eulerwiege 58  
Ewaldkugel 55, 57, 58, 64  
Extrusionen 283

## F

Fallgewichtsversuch 352  
Farbätzen 98  
Faser, neutrale 212  
Fehlerecho 134  
Fehlernachweis 143  
Feinstrukturanalyse 36, 38, 57, 60, 69  
Festigkeitsschaubilder 272  
Flachbiegeschwellbeanspruchung 274  
Flachbiegewechselbeanspruchung 274  
Flächenanalyse 86  
Flachschliff 92  
Flachzugprobe 151, 257  
Fließgrenze 157, 179, 311, 326, 386  
Fließkurve 162, 173  
Fließspannung 162, 166  
Förderliche Vergrößerung 104, 111  
Formänderung 162, 165, 259  
Formänderungsfestigkeit 162  
Formänderungsgeschwindigkeit 165, 182, 187  
Formänderungsgeschwindigkeitsabhängigkeit 173  
Formänderungsgeschwindigkeitsempfindlichkeit 175, 180  
Fotoeffekt 123, 124  
Funkentladung 79

## G

Gasblasen 89, 95  
Gefüge 89, 90, 96  
General yield 331  
Gesamtdehnungsamplitude 278  
Gesamtdehnungsamplitude, wahre 291  
Gesamtdehnungsmaxima 280  
Gestaltänderungsenergie-dichte-Hypothese 207  
Gewaltbruch 388  
Gitterparameter 36, 68  
Gitter, reziproke 55  
Gitterstruktur 68  
Glanzwinkel 51, 56, 60, 63  
Gleichgewichtstemperatur 28, 76  
Gleichgewichtszustand 22  
Gleichgewichtszustandsdiagramm 22, 29  
Gleichmaßdehnung 160, 179, 337  
Gleitbruch 333, 338, 340, 344, 363, 364  
Gleitebene 171  
Gleitrichtung 171  
Glühkathode 43  
Grenzwinkelzahl 287  
Grenztemperatur 351  
Grenzwöhlerkurve 295  
Großzugproben 350  
Grundzustand 77, 78

## H

Haltepunkt 24  
Haltezeit 24  
Härtekorrelationen 237  
Hartmetallkugel 221, 231  
Hauptenergieniveaus 47  
Hauptnormalspannung 203, 316  
HCF 280  
Hellfeld 104, 111, 113  
Hilfsdurchflutung 143  
Hochlage 344, 346  
Hochtemperatur-Plastizität 273  
Hochtrainieren 304  
Hohlräume 259  
Hookesches Gesetz 156  
Hück 295

## I

Immersionsflüssigkeit 103  
Impuls-Echo-Verfahren 134  
Impuls-Laufzeit-Verfahren 134, 191  
Impulsthermographie 145  
Initialrissspitzenaufweitung 372  
Interferenzverfahren 105  
Intrusionen 283  
Ionisierungsenergie 47  
Isotrop 60

## J

J-Integral 364  
J-Integral, kritisches 356  
J- $\Delta$ -Diagramm 377

## K

Kaltverformung 92  
Kapillarkraft 146  
Kerbaufweitung 359, 360, 375  
Kerben 312  
Kerbgeometrien 356  
Kerbschlagarbeit 344, 346  
Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve 344  
Kerbwirkung 284  
Kleinlasthärteprüfung 229  
Knoop 229  
Kompakt-Zugprobe 386  
Kompressionsmodul 193  
Konstruktionswerkstoffe 16  
Kontrastfarbe 143  
Kontraststeigerung 143  
Koppelmedium 132  
Korndurchmesser 132  
Korngrenze 88  
Kraft-Aufweitungskurve 361

Kraft-Durchbiegungs-Kurve 348, 375, 376  
Kraftliniendichte 316  
Kraft-Verschiebungs-Kurve 376  
Kriechdehnung, zeitabhängige 259  
Kriechen, logarithmisches 261  
Kriechen, sekundäres 259, 266  
Kriechen, stationäres 259  
Kriechen, tertiäres 259  
Kriechgeschwindigkeit 259  
Kriechkurve 258  
Kristallstruktur 75, 171, 335  
Kugelstrahlen 299  
Kugelwellen 49  
Kurzzeitfestigkeit 283  
Kurzzeitschwingfestigkeit 283

## L

Lambert-Beer-Gesetz 111, 123, 129  
Längsschliff 92  
Langzeitfestigkeit 280  
Langzeitschwingfestigkeit 280  
Larson-Miller-Parameter 270  
Laststeigerungsgeschwindigkeit 153  
LCF 283  
Lebensdauer 288  
Lebensdauerabschätzungen 266  
Leebhärte 249  
Lichtspektroskopie 78  
Linearspektrometer 83  
Line-scan 85  
Linienanalyse 85  
Linienanalyseverfahren 108  
Log  $\Delta\sigma$ -log N-Darstellung 389  
Low-Cycle-Fatigue 283  
Lüdersbänder 159  
Lüdersdehnung 158  
Lüdersfront 160  
Luftpalt 132  
Lunker 89, 95

## M

Magnetisierung 143  
Magnetpulverprüfung 141  
Makrohärtebereich 227  
Makroplastifizierung 280  
Martenshärte 242  
Mehrkreis-Diffraktometer 58  
Messkreis 87  
Metallographie 149  
Mikroanalyse 81  
Mikrohärteprüfung 229  
Mikroplastifizierung 283, 336  
Mikroskop 90  
Miller-Bravais-Indizes 39  
Millerscher Index 69

Mischbruch 334, 344  
Mischkristallzusammensetzung 70  
Mittelgesamtdehnung 278  
Mittelspannung 275, 300  
Mohrsche Waage 73  
Monochromator 55  
Multielementanalyse 80

## N

Nachgiebigkeit, elastische 370, 379  
Nahfeld 137  
Näpfchen 189  
Nebenlinien 378  
Netzebenenabstand 36, 39, 41  
Netzebenenscharen 36  
Newtonsche Abkühlungsgesetz 24  
Nil-Ductility-Transition-Temperatur 351  
Normalkraftbereich 227  
Normalprüfköpfe 136

## O

Oberfläche, äußere 89, 90, 114  
Oberflächenenergie, spezifische 320, 325  
Obergesamtdehnung 278  
Oberspannung 276, 300  
Ordnungszahlkontrast 116

## P

Peierls-Spannung 170  
Pendelhammer 342  
Persistente Gleitbänder 283  
Phasengrenze 88  
Phasenkontrastverfahren 105  
Phasenumwandlung 30  
Phasenumwandlung, endotherme 29  
Phasenumwandlung, exotherme 29  
Phasenvolumenanteil 107  
Plastifizierung 318, 340  
Poissonsches Gesetz 321  
Poissonzahl 128, 129, 156  
Polarisationsverfahren 106  
Polarisator 106  
Poldihammer 246  
Polfigur 71  
Portevin-LeChatelier-Effekt 160, 251  
Potenzialmessmethode 370, 379  
Primärelektronen 43  
Primärspule 139  
Probe, angerissene 312  
Probe, gedünnte 61  
Probeneinfassung 93  
Probeneinschnürung 155  
Probennahme 92  
Probenwahl 92

Projektion, stereographische 70  
 Proportionalprobe 151  
 Prüfgesamtkraft 234  
 Prüfgeschwindigkeit 196  
 Prüfkopftypen 135  
 Prüfvorkraft 234  
 Punktanalyse 85  
 Punktanalyseverfahren 109

## Q

Quantitative Bildanalyse 110  
 Quantitative Phasenanalyse 70  
 Querdehnungsbehinderung 322  
 Querkontraktion 156, 162, 165, 321  
 Querkraftverlauf 212  
 Querschleif 92  
 Quetschgrenze 198, 300

## R

Randabstand 221, 231  
 Randfaserspannung 298  
 Randschiebewinkel 205  
 Rasterelektronenmikroskop 114  
 Rastlinien 285  
 Reckalterung, dynamische 160  
 Reflexionsgesetz 130  
 Restbruch 285  
 Richtreihen 106  
 Riss 89, 95, 199, 259  
 Rissabstumpfung 328  
 Rissaufweitung 328  
 Rissbildung 230, 274  
 Risskeim 259  
 Risslänge 369, 370  
 Risslänge, effektive 328  
 Risswachstum 274  
 Risswachstum, instabiles 318  
 Risswachstumsrate 384, 388  
 Risswachstum, stabiles 377  
 Risszähigkeit 17, 18, 320, 329, 356, 360  
 Ritzhärte 217  
 Robertsonprobe 354  
 Rockwell 231  
 Röntgenbremsstrahlung 43, 48  
 Röntgen-Computertomographie 125  
 Röntgenfluoreszenzanalyse 78  
 Röntgenfluoreszenzstrahlung, charakteristische 87  
 Röntgenprimärstrahlung 87  
 Röntgenspektrometer 82  
 Röntgenspektrometer, energiedispersives 84  
 Röntgenspektrometer, wellenlängendispersives 82  
 Röntgenstrahlung 65, 78, 119  
 Röntgenstrahlung, charakteristische 43, 45, 48, 78, 81  
 Röntgenstrahlung, Monochromatische 57  
 Rotationsschlagwerk 347

Rowlandkreis 83  
 Rücksprunghärteprüfverfahren 218, 248, 249  
 Rückstreuelektronen 44, 114, 116  
 Rückverformung, elastische 248  
 Rückwandecheo 134  
 Rundzugproben 151, 257  
 r-Wert 188

## S

Schadenslinie 302  
 Schallemissionsverfahren 370, 379  
 Schallgeschwindigkeit 128, 318  
 Schallintensität 129  
 Schallwellenwiderstand 129  
 Scharniermodell 367  
 Scherbruch 199  
 Scherlippe 285, 338  
 Schiebewinkel 203  
 Schlagarbeit 344, 346  
 Schlankheitsgrad 196  
 Schleif 93  
 Schubmodul 128, 129, 193, 207  
 Schubspannung 313  
 Schubspannung, kritische 313  
 Schwächungskoeffizient 123  
 Schwärzung 121  
 Schwebemethode 74  
 Schwingbreite der Spannung 383  
 Schwingbruch 274  
 Schwinger 133  
 Schwingenspiel 276  
 Schwingspielfrequenz 276  
 Schwingstreifen 285  
 Schwingversuch 274  
 Seitliche Breitung 344  
 Sekundärelektron 45, 114, 116  
 Sekundärspule 139  
 Selbstdurchflutung 143  
 Sendeimpuls 134  
 Shorehärte 248  
 Simultanspektrometer 80  
 Spaltbruch 323, 330, 336, 337, 340, 344  
 Spaltbruchebeine 313  
 Spaltbruchspannung, mikroskopische 338  
 Spannungsamplitude 276, 300  
 Spannung, scheinbare 155  
 Spannungs-Dehnungs-Hysterese 278  
 Spannungs-Dehnungs-Kurve, scheinbare 155  
 Spannungs-Dehnungs-Kurve, zyklische 281  
 Spannungsintensitätsfaktor 316, 320, 329, 356  
 Spannungsintensitätsfaktor, zyklischer 384, 386, 388  
 Spannungsspitze 314  
 Spannungsüberhöhung 315  
 Spannungsverhältnis 277  
 Spannungsverteilung, asymmetrische 215  
 Spannungsverteilung, inhomogene 314

Spannungszustand, ebener 328, 329  
 Spannung, wahre 162  
 Spektrometerkristall 83  
 Spektroskopie 77  
 Spitzenradius 312, 317  
 Spitzenverrundung 318  
 Spitzkerb 342  
 Sprödbrech 311, 312, 336, 337, 338, 340  
 Statistische Auswertungen 293  
 Stauchgrenze 198  
 Stauchung, scheinbare 198  
 Steifigkeit 17  
 step-scan 85  
 Stoffdiagnose 70  
 Strahlungsintensität 121  
 Streckgrenze 158, 300  
 Streckgrenzendehnung 158  
 Streckgrenze, obere 158  
 Streckgrenze, untere 154  
 Streckungsverhältnis 110  
 Streckzieheignung 178  
 Superplastizität 182, 186

## T

TEM 61, 111  
 Textur 65, 188  
 Thermoschock 280  
 Thermospannungsdifferenz 28  
 Tieflage 344, 349  
 Torsionsdehngrenze 207  
 Torsionsfestigkeit 207  
 Torsionsfließgrenze 207  
 Torsionsschwellbeanspruchung 275  
 Torsionswechselbeanspruchung 275  
 Torsionswinkel 203  
 Trainiereffekte 304  
 Transmissionselektronenmikroskop 111  
 Transversalwellen 128  
 Treppenstufenverfahren 295  
 Trichter-Kegel-Bruch 338

## U

Übergangsbereich 344  
 Übergangskriechen 259  
 Übergangstemperatur 346  
 Überlebenswahrscheinlichkeit 293  
 Ultraschallverfahren 370, 379  
 Ultraschallwelle 191  
 Umlaufbiegewechselbeanspruchung 274  
 Umwandlung, allotrope 75, 251  
 Umwandlungshysterese 28  
 Universalhärte 241  
 Untersuchung, metallographische 91  
 UV-Mikroskop 103

## V

VDI/VDE Richtlinien 2616-1 247  
 Verfestigungsexponent 175, 179, 180  
 Verformung, plastische 60, 310, 335  
 Verformungsarbeit 325, 377  
 Verformungsenergie 373  
 Verformungsgeschwindigkeit 326, 334  
 Verformungsinstabilität 154  
 Verformungsverhalten, quasi linear-elastisches 314  
 Vergleichsspannungshypothese 207  
 Vergrößerung 90  
 Versagensspannung 17, 18  
 Versuchsdurchführung, dehnungskontrollierte 275  
 Versuchsdurchführung, spannungskontrollierte 275  
 Vickers 224  
 Vickersdiamant 247  
 Vielprobenmethode 369, 370, 378, 379  
 Volumenänderung 75  
 Volumenkonstanz 163  
 Vorzugsorientierung 60

## W

Waage, hydrostatische 73  
 Wabenbruch 333, 340  
 Walzrichtung 92  
 Wanddickenkonstanz 190  
 Wärmeausdehnungskoeffizient 16  
 Wärmeausdehnungskoeffizient, linearer 31, 74  
 Wärmeleitfähigkeit 16, 33  
 Wärmemenge, spezifische 29  
 Wärmestrom-Differenz-Kalorimetrie 29  
 Warmhärteprüfvorrichtung 249  
 Warmtorsionsversuch 208  
 Warmzugversuch 153, 187, 267  
 WDX 82  
 Wechselverformung 308  
 Weggesteuerte Versuchsführung 153, 211  
 Wehneltzylinder 63  
 Werkstofftrennungen, innere 90  
 Werkstofftrennungen, lokale 118  
 Werkstoffverhalten, elastisch/ideal-plastisches 326  
 Wiederanschwingen 369, 378  
 Winkelprüfköpfe 136  
 Wöhlerdiagramm 286, 288  
 Wöhlerkurve 286, 288, 301

## Z

Zähbruch 311, 337, 340, 341  
 Zählrohr 57, 65, 87  
 Zeitbruchdehnung 259, 265  
 Zeitbrucheinschnürung 265  
 Zeitdehnschaubild 263  
 Zeitdehnschaubild, logarithmisches 263  
 Zeitfestigkeit 287

Zeitschwingfestigkeit 287

Zeitstandschaubild 264

Zeitstandschaubild, lineares 264

Zeitstandschaubild, logarithmisches 264

Zeitstandsversuch 179, 256

Zipfel 190

Zone, plastische 326, 328

Zugbeanspruchung 150

Zug-Druck-Wechselbeanspruchung 274

Zugfestigkeit 160, 179, 237

Zugschwellbeanspruchung 274

Zugspannung 334

Zugspannung, kritische 313

Zugspannungs-Temperatur-Korrelationen 350

Zustand, angeregter 77

Zustandsänderung 22, 29