

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 ΔT 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 ΔT linear zu. Ist die Umwandlung abgeschlossen, so nähert sich die Probentemperatur 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 ΔT - 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 ΔT in erster Näherung gültige lineare Wärmeausdehnungskoeffizient α (α ist in Realität parabolisch von T abhängig) ergibt sich aus der Längenänderung Δl , die sich bei der Temperaturänderung ΔT einstellt, zu

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

Wegen der parabolischen Abhängigkeit der Längenänderung Δl von der Temperaturänderung ΔT ist die Genauigkeit des linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten umso höher, je kleiner die Temperaturdifferenz ΔT 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 Durchföhrung hindurchföhrt und möglichst reibungsfrei gelagert ist,

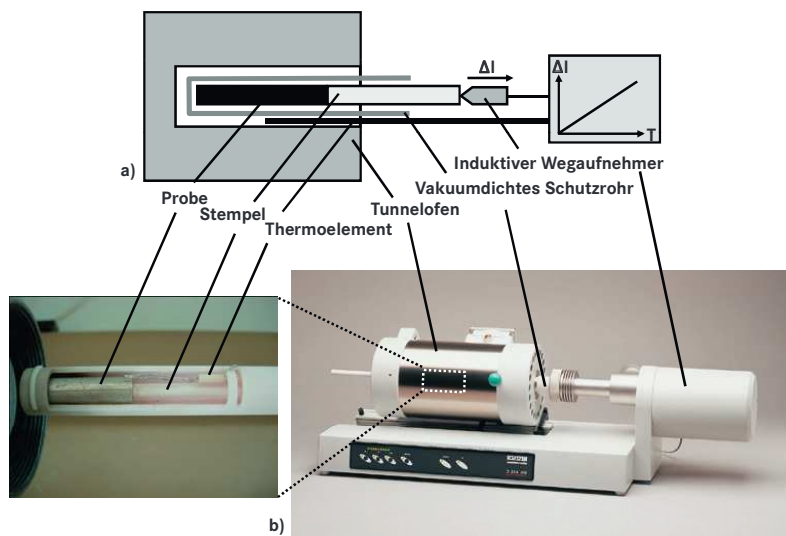


Bild 2.10 Darstellung eines Dilatometers

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 α , der sich für den Temperaturbereich ΔT ergibt, resultiert aus der Steigung der zugehörigen Sekante nach (2.11).

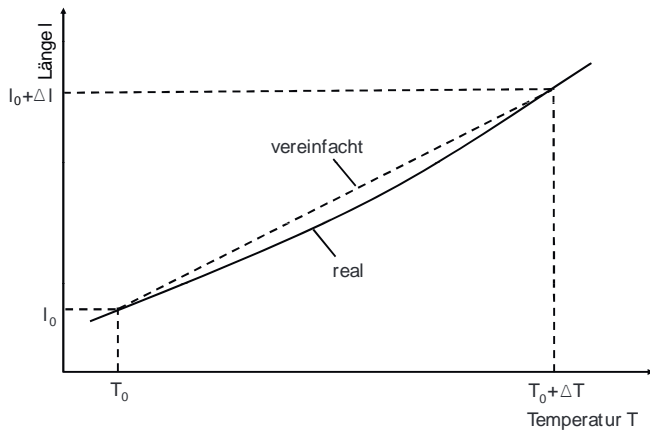


Bild 2.11 Reale und in erster Näherung geltende Beziehung zwischen Probenlänge I und Temperatur T

■ 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 λ des wärmeleitenden Werkstoffs zu

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

■ □□ 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.

□□□ 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-

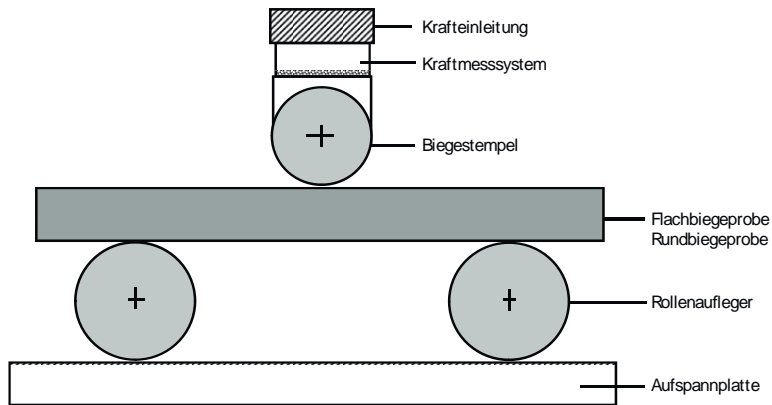


Bild □□□ Prinzipielle Anordnung beim Dreipunktbiegeversuch

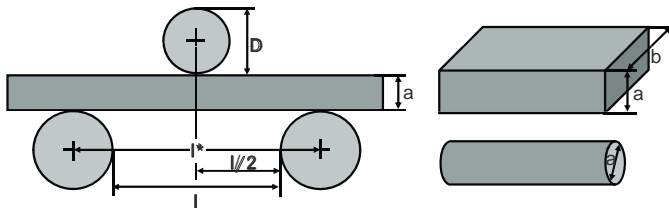


Bild □□□ Biegeprobe

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).

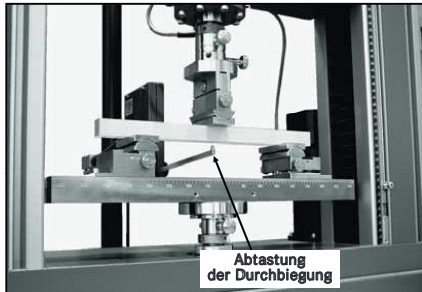
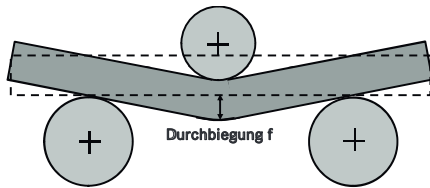


Bild 6.60 Abtastung der Durchbiegung der Biegeprobe (Foto: ZMCK)

6.4.1 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 .

6.6.1 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 Querkräfte 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.

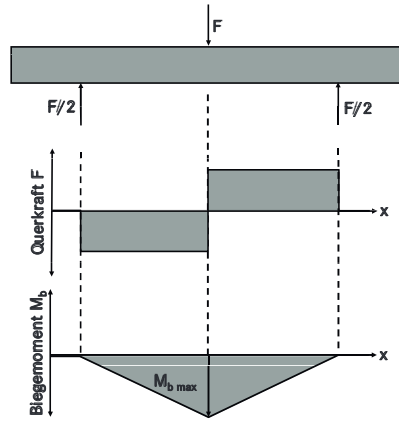


Bild 6.61 Querkraftverlauf und Biegemomentenverlauf über die Probenlänge bei einem Dreipunktbiegeversuch

Infolge des zwischen den Rollenauflegern 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

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

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

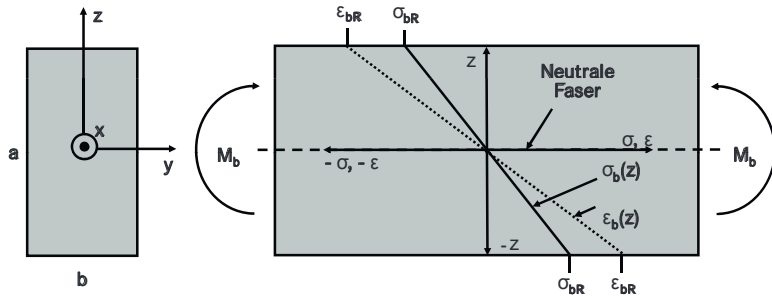


Bild 6.11 Spannungverteilung und Dehnungsverteilung im Querschnitt eines elastisch beanspruchten Biegebalkens bei symmetrischen Fließkurven des Werkstoffes im Zugversuch und Druckversuch

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

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

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

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

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

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

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

$$\epsilon_b(z) \approx \frac{12 f}{(l^*)^2} z \tag{6.130}$$

Die Gleichungen (6.125) und (6.130) zeigen, dass $\sigma_b(z)$ und $\epsilon_b(z)$, 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 $\epsilon_b(z)$. In den Randfasern der Probe, bei $z = \pm a/2$ also, treten die größten Spannungen und Dehnungen auf. Die Biegerandspannung σ_{bR} und die Biegeranddehnung ϵ_{bR} lassen sich berechnen zu

$$\sigma_{bR} \approx \frac{F l^*}{4 I} \frac{a}{2} \tag{6.131}$$

$$\epsilon_{bR} \approx \frac{1}{E} \frac{F l^*}{4 I} \frac{a}{2} \tag{6.132}$$

Wird die Kraft F und damit das Biegemoment $M_{b,max}$ so weit gesteigert, dass die Biegerandspannung σ_{bR} die Biegeelastizitätsgrenze σ_{eF} 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 ϵ_b aus einem elastischen und einem plastischen Teil zusammen. Die lineare Abhängigkeit für ϵ_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.

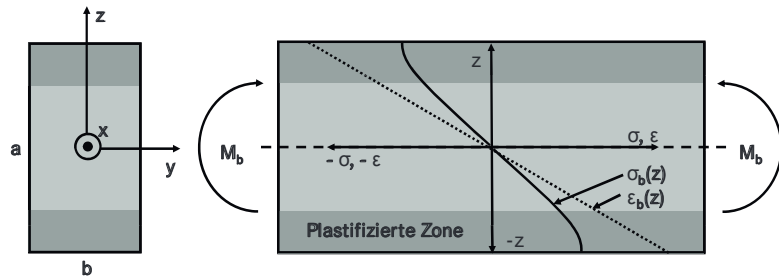


Bild 6.63 Spannungsverteilung und Dehnungsverteilung im Querschnitt eines elastisch/ plastisch beanspruchten Biegebalkens

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 effektiven Biegerandspannung σ_{bR} führt. Bild 6.64 zeigt im Vergleich die tatsächlich wirksame Normalspannung und die effektive Spannungsverteilung: Die wahre Spannung ist im Bereich der elastisch/plastischen Verformung zunächst kleiner als die effektive Spannung. Weiter innen liegt die wahre Spannung höher.

□□□□ Proben eines kubisch-□ächenzentriert vorliegenden Werksto□s

Kubisch-□ächenzentriert vorliegende polykristalline Werksto□e 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 σ_f durch thermische Aktivierung zeigt daher hier nur noch wenig Wirkung: Die Fließgrenze σ_f , Zugfestigkeit R_m und Bruchspannung σ_{KRIT} sind nur wenig temperaturabhängig und liegen über den ganzen technisch genutzten Temperaturbereich unterhalb der mikroskopischen Spaltbruchspannung σ_{KRIT}^* (Bild 9.33). Bei niedrigsten kubisch-□ächenzentriert vorliegenden Werksto□en kommt es daher bei diesen Temperaturen bei glatten wie ange-rissenen Proben zu einem Zähbruch, d. h. zu einer deutlichen Bruchdehnung.

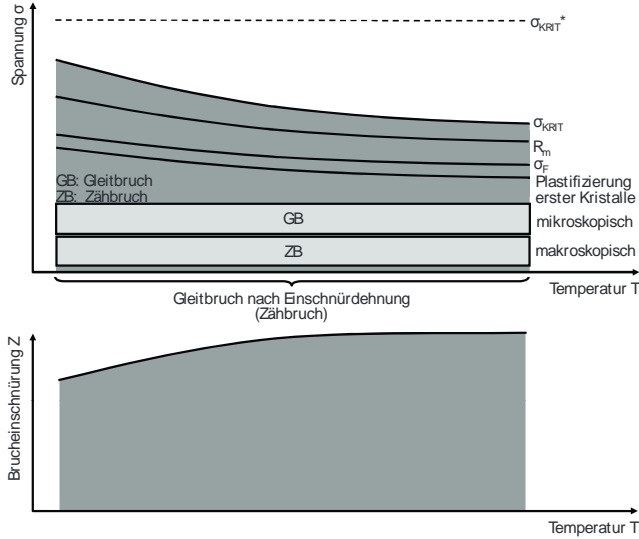


Bild □□□ Temperaturabhängigkeit der Fließgrenze σ_f , Zugfestigkeit R_m , Bruchspannung σ_{KRIT} und mikroskopischen Spaltbruchspannung σ_{KRIT}^* sowie der Brucheinschnürung Z einer glatten Zugprobe aus einem kubisch-□ächenzentriert vorliegenden Werksto□

■ □.□ Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch ist wegen seiner kostengünstigen Probenfertigung und der einfachen Versuchsdurchführung das am häufigsten angewendete Verfahren zur Ermittlung der Werksto□zähigkeit und somit zur qualitativen Beurteilung der Bauteilsicherheit beim Vorliegen eines spröbruchbegünstigenden Spannungszustandes sowie einer spröd-

bruchbegünstigenden Verformungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur. Von Nachteil ist, dass die ermittelten Kennwerte *geometrieabhängig* sind und nur qualitativ auf Bauteile desselben Werkstoffes 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.

9.3.3 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.

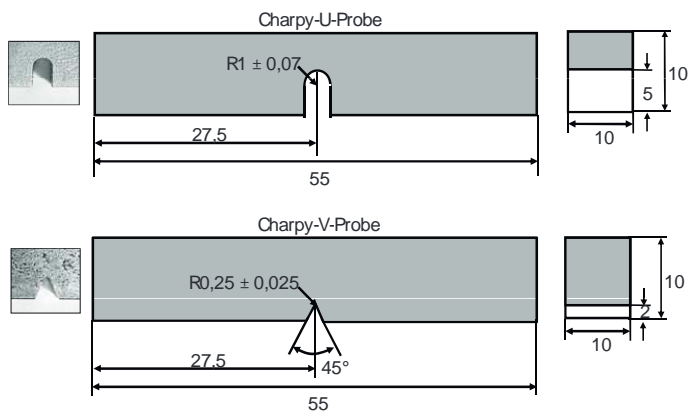


Bild 9.34 Probengeometrien nach Charpy

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 Auftreßgeschwindigkeit auf die Probe bei 5,0 m/s bis 5,5 m/s liegt (Bild 9.35).

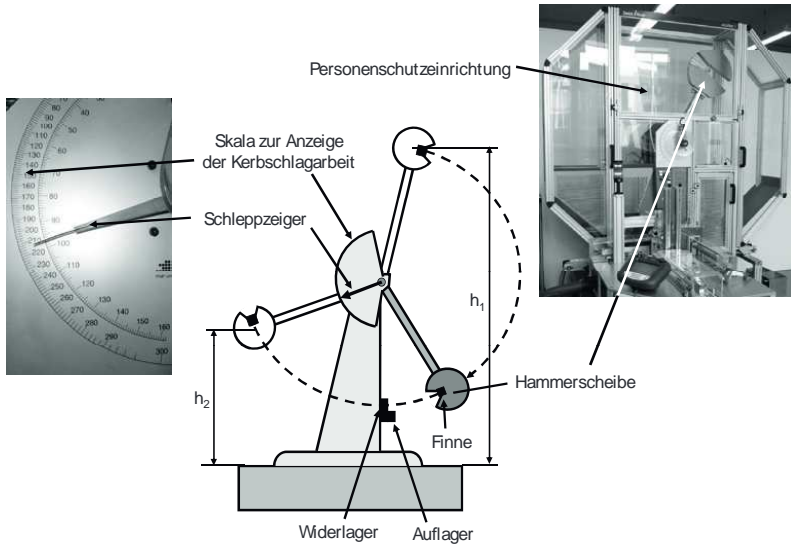


Bild 9.35 Anordnung beim Kerbschlagbiegeversuch

9.36 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.

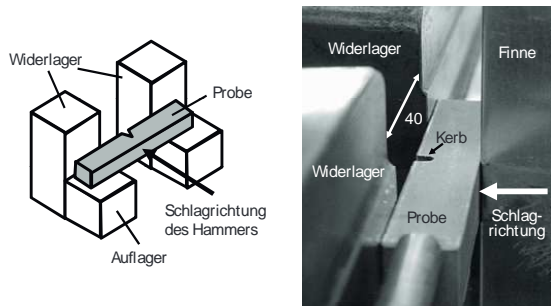


Bild 9.36 Zur Durchführung des Kerbschlagbiegeversuchs

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 Hammerköpfe in Kerbebene auf der der Kerbe gegenüberliegenden Seite der Probe aufliegt. 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 Pendelhammers, so zum Beispiel KU 100 = 129 J.

9.3.3 Ergebnis

Bei den Werkstoffen, die in einem werkstoffspeziellen 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).

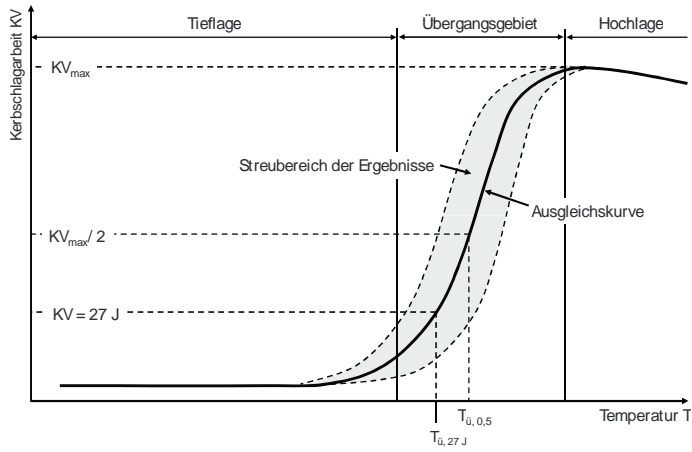


Bild 9.1 S-förmiger Verlauf der Kerbschlagarbeit in Abhängigkeit von der Temperatur bei kubisch-raumzentriert und hexagonal dicht gepackt vorliegenden Werkstoffen

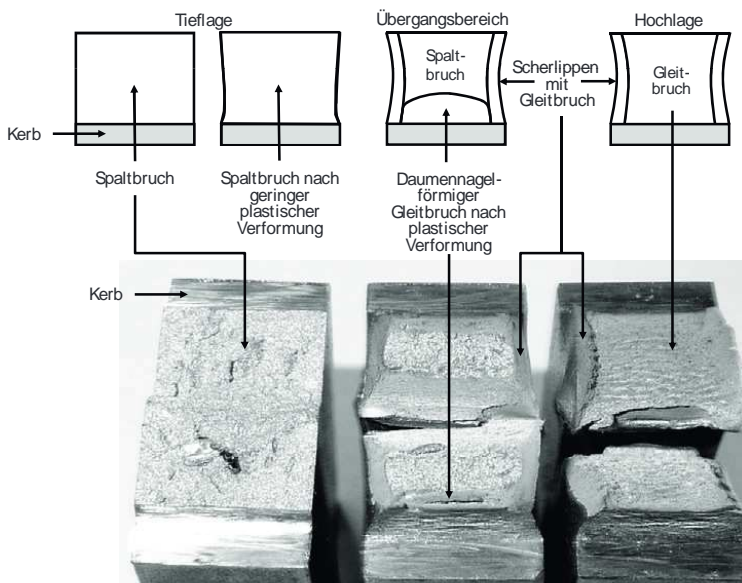


Bild 9.2 Bruchmorphologie in Abhängigkeit von der Prüftemperatur

Index

Symbole

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

A

Abbildungstreue 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
Anrisschwingenspielzahl 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
Aulichtmikroskop 91, 96, 101
Aulösung 84, 85, 116, 117
Aulriebsprinzip 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
Beugungsrelex 52, 55
Biegedehngrenze 216
Biegefestigkeit 216
Biegetiefengrenze 214, 216
Biegekrümmung 348
Biegemoment 212
Biegemomentenverlauf 212
Biegeproben 350
Biegerandspannungs-Biegeranddehnungs-Kurve 216
Bildauswertung 147
Bildgütezahl 122
Blausprödigkeit 306
Blunting line 377
Bollmannverfahren 62
Bragsche 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
Bruchschwingenspielzahl 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
Compton-Effekt 123, 124
Considère-Kriterium 168
Cottrellwolken 160
Crack-Arrest-Temperature-Kurve 353

Crack tip opening displacement 364

D

da/ dN-ZK-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
 Dilatometer 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
 Doppelstrahlrinnen 62
 Drehkristalverfahren 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
 Enkristall 55, 57
 Enprobenmethode 370, 379
 Einschallwinkel 131, 135
 Einschüsse 333
 Einschüsse, 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
 Fehlermachweis 143
 Feinstrukturanalyse 36, 38, 57, 60, 69
 Festigkeitsschaubilder 272
 Flachbiegeschwellbeanspruchung 274
 Flachbiegewechselbeanspruchung 274
 Flächenanalyse 86
 Flachslicht 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
 Funkenentladung 79

G

Gasblasen 89, 95
 Gefüge 89, 90, 96
 General yield 331
 Gesamtdehnungsamplitude 278
 Gesamtdehnungsamplitude, wahre 291
 Gesamtdehnungsmaxima 280
 Gestaltänderungsenergiegedichte-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
 Geitebene 171
 Geitrichtung 171
 Gütinkathode 43
 Grenzschnitzspielzahl 287
 Grenztemperatur 351
 Grenzwöhlerkurve 295
 Großzugproben 350
 Grundzustand 77, 78

H

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

I

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

J

J-Integral 364
 J-Integral, kritisches 356
 J_Δ-Diagramm 377

K

Kaltverformung 92
 Kapillarkra λ 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
 Kra λ -Aufweitungskurve 361

Kra $\bar{\nu}$ -Durchbiegungs-Kurve 348, 375, 376
 Kra $\bar{\nu}$ -Liniendichte 316
 Kra $\bar{\nu}$ -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
 Liniyanalyse 85
 Liniyanalyseverfahren 108
 Log $\Delta\sigma$ -log N-Darstellung 389
 Low-Cycle-Fatigue 283
 Lüdersbänder 159
 Lüdersdehnung 158
 Lüdersfront 160
 Lu $\bar{\nu}$ -spalt 132
 Lunker 89, 95

M

Magnetisierung 143
 Magnetpulverprüfung 141
 Makrohärtebereich 227
 Makroplastifizierung 280
 Martenshärte 242
 Mehrkreis-Dilatometer 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
 Normalkra $\bar{\nu}$ -bereich 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
 Poligur 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
 Prüfgesamtkra \square 234
 Prüfgeschwindigkeit 196
 Prüfkop \square ypen 135
 Prüfvorkra \square 234
 Punktanalyse 85
 Punktanalyseverfahren 109

Q

Quantitative Bildanalyse 110
 Quantitative Phasenanalyse 70
 Querdehnungsbehinderung 322
 Querkontraktion 156, 162, 165, 321
 Querkra \square verlauf 212
 Querschli \square 92
 Quetschgrenze 198, 300

R

Randabstand 221, 231
 Randfaserspannung 298
 Randschiebewinkel 205
 Rasterelektronenmikroskop 114
 Rastlinien 285
 Reckalterung, dynamische 160
 Re \square xtensionsgesetz 130
 Restbruch 285
 Richtreihen 106
 Riss 89, 95, 199, 259
 Rissabstumpfung 328
 Rissaufweitung 328
 Rissbildung 230, 274
 Risskeim 259
 Risslänge 369, 370
 Risslänge, e \square ktive 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
 Röntgen \square uoreszenzanalyse 78
 Röntgen \square uoreszenzstrahlung, 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
 Rückstreuielektronen 44, 114, 116
 Rückverformung, elastische 248
 Rückwandecho 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
 Schli \square 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
 Schwingspiel 276
 Schwingspielfrequenz 276
 Schwingstreifen 285
 Schwingversuch 274
 Seitliche Breitung 344
 Sekundärelektron 45, 114, 116
 Sekundärspule 139
 Selbstdurch \square utung 143
 Sendepuls 134
 Shorehärte 248
 Simultanspektrometer 80
 Spaltbruch 323, 330, 336, 337, 340, 344
 Spaltbruchebene 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
 Stoßdiagnose 70
 Strahlungsintensität 121
 Streckgrenze 158, 300
 Streckgrenzendeckung 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
 Tieftage 344, 349
 Torsionsdehngrenze 207
 Torsionsfestigkeit 207
 Torsionsfestigkeitsgrenze 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
 Umlaufbiegwechselbeanspruchung 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
 Wändickenkonstanz 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
 Werkstoffrinnungen, innere 90
 Werkstoffrinnungen, lokale 118
 Werkstoffverhalten, elastisch/ideal-plastisches 326
 Wederanschwinger 369, 378
 Winkelprüfköpfe 136
 Wöhlerdiagramm 286, 288
 Wöhlerkurve 286, 288, 301

Z

Zählbruch 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