

8. Mechanische Eigenschaften und Prüfverfahren

Das mechanische Verhalten von Werkstoffen wird durch mechanische Eigenschaften beschrieben, die durch einfache idealisierte Versuche bestimmt werden. Diese Prüfungen beinhalten unterschiedliche Belastungsarten. Die in verschiedenen Handbüchern zusammengebauten Materialkennwerte sind Ergebnisse solcher Messungen. Bei ihrer Verwendung müssen die Versuchsbedingungen beachtet werden, unter denen sie gewonnen wurden.

Die Auswahl von Werkstoffen richtet sich nach den Anforderungen, denen sie im Anwendungsfall genügen müssen. Dabei stehen häufig die mechanischen Beanspruchungen im Vordergrund. Ihre Ermittlung setzt sorgfältige Analyse aller Einsatzbedingungen voraus. Wird ein festes, starres oder verformbares Material benötigt? Liegt eine Dauerbeanspruchung bei erhöhter Temperatur vor? Muss Das Material mechanischem Verschleiß widerstehen? Aus diesem Fragenkatalog ergeben sich die zu erfüllenden Hauptanforderungen. Als nächster Schritt folgt die Auswahl eines dafür geeigneten Werkstoffs anhand von Datenlisten, die uns z.B. aus Materialhandbüchern zur Verfügung stehen. Das setzt allerdings voraus, dass uns die Bedeutung und Definition der dort angegebenen Kenngrößen und die zu ihrer Bestimmung angewandten Messverfahren genau bekannt sind. Es muss beachtet werden, dass diese Kennwerte unter idealisierten Prüfbedingungen ermittelt wurden, die häufig nur näherungsweise mit der realen Einsatzsituation übereinstimmen.

8.1 Zugversuch

Der Zugversuch beschreibt das Verhalten eines Werkstoffs gegenüber langsam ansteigender Zugspannung bis zum Bruch der Probe.

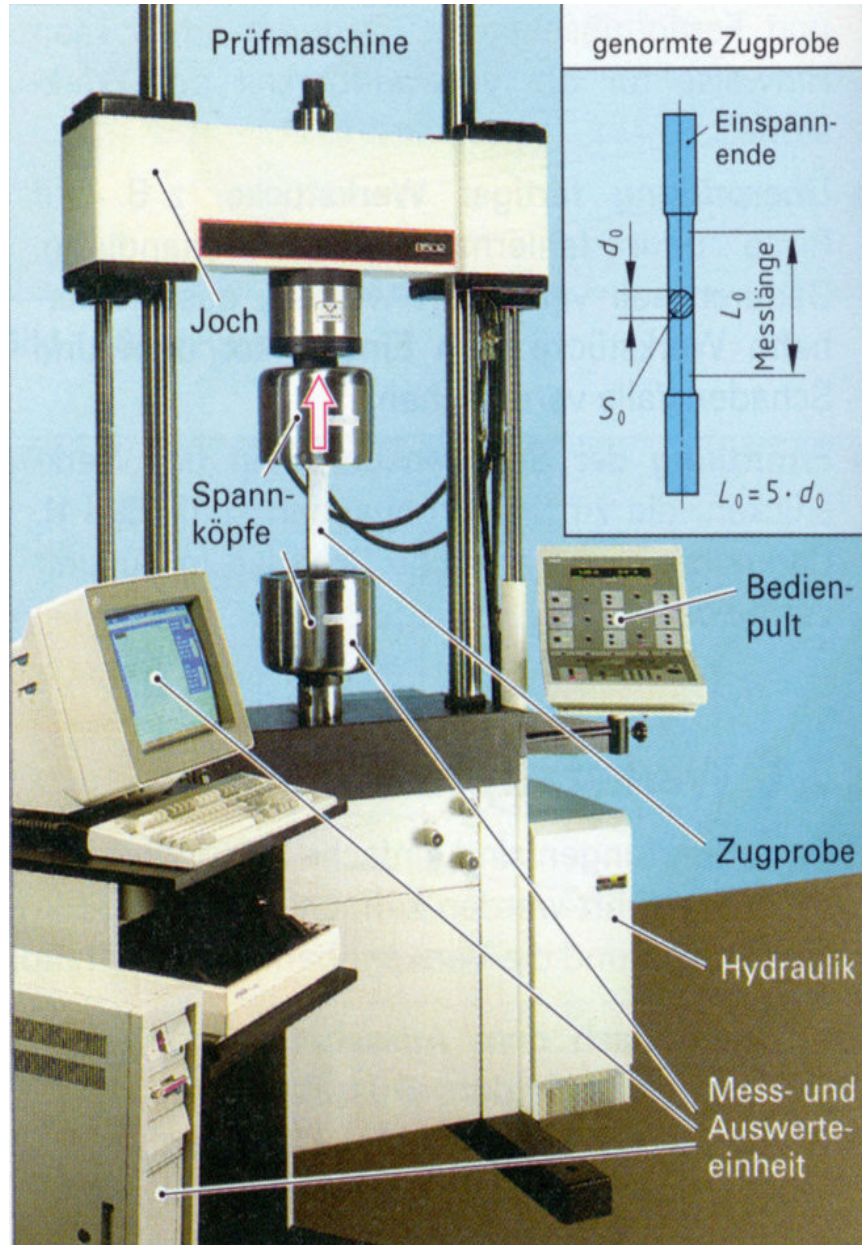


Abb. 8.1 Zugprüfmaschine

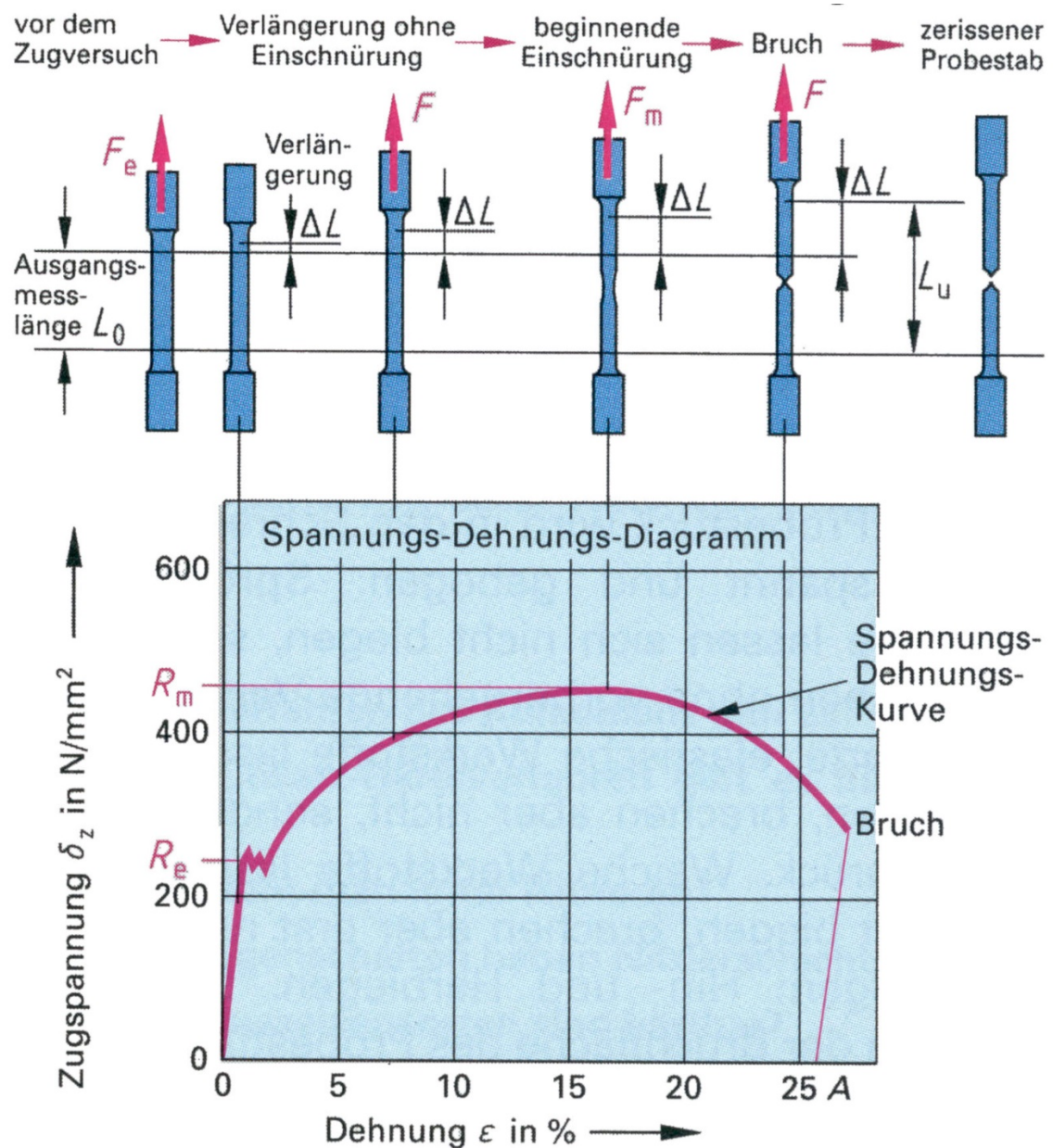


Abb. 8.2 Verformung einer Zugprobe mit ausgeprägter Streckgrenze im Laufe eines Zugversuches

Die (mechanische) Spannung ist die aufgebrachte Kraft, bezogen auf den Querschnitt der Probe. Da sich der Querschnitt während des Versuches ändert, misst man während eines Zugversuches typischerweise die **Technische Spannung**, die sich auf den Anfangsquerschnitt der Probe bezieht.

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

Als Dehnung bezeichnet man die relative Längenänderung $\varepsilon = \Delta l / l$. Die beim Zugversuch verwendete **Technische Dehnung** bezieht sich auf die Anfangslänge der Probe vor dem Versuch.

$$\varepsilon = \Delta l / l_0$$

Aus dem Zugversuch können folgende Materialkennwerte ermittelt werden:

Elastizitätsmodul. Steigung der Spannungs-Dehnungs-Kurve im elastischen Bereich. Je größer der E-Modul, desto steifer ist die Probe

Zugfestigkeit R_m . Spannungswert, der maximalen Belastung beim Zugversuch entspricht.

Streckgrenze R_e . Spannungsbelastung beim Zugversuch, bei der die plastische Verformung beginnt.

Plastische Verformung. Verbleibende Materialverformung nach Beenden der Krafteinwirkung.

Bruchdehnung A . Bleibende Verlängerung der Probe nach dem Bruch, bezogen auf die Anfangslänge.

Brucheinschnürung Z . Maximale relative Querschnittsminderung einer Probe im Zugversuch. Die Einschnürung beginnt ab der Zugfestigkeitsbelastung.

$$Z = S/S_0$$

Duktilität ist die Eigenschaft eines Werkstoffs, sich unter Scherbelastung vor einem Bruch plastisch zu verformen. Glas hat eine sehr niedrige Duktilität. Daher bricht es ohne erkennbare Verformung. Solche Materialien nennt man spröde. Baustahl hingegen verformt sich plastisch um mehr als 25 %, bevor er reißt.

Duktilbruch ist Folge von Materialbelastung oberhalb der Streckgrenze. Er ist normalerweise gekennzeichnet durch starke Verformung des betroffenen Teils mit Einschnürung und Krater- bzw. Konusform der beiden Bruchhälften sowie durch Ausbildung von Scherlippen und wabenförmig aufgerauten Bruchflächen.



Abb. 8.3 Bruchbilder nach einem Zugversuch.
Links: duktiles Material, rechts: sprödes Material

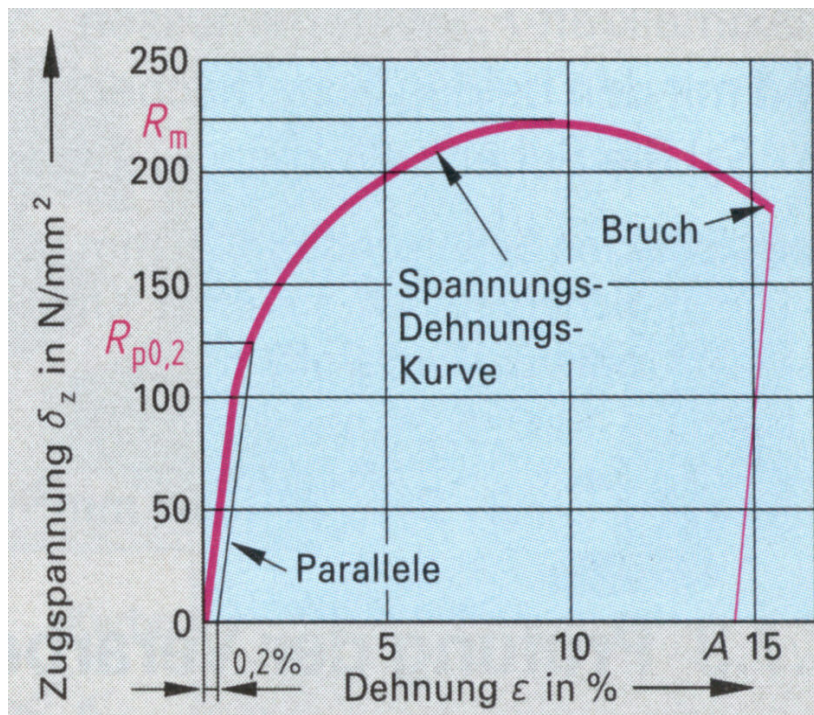


Abb. 8.4 Spannungs-Dehnungsdiagramm eines Materials ohne ausgeprägte Streckgrenze

Zahlreiche Materialien zeigen keine ausgeprägte Streckgrenze. Für solche Materialien definiert man eine **Ersatzstreckgrenze R_p** . Ihr Wert definiert einen Spannungszustand, bei dem die plastische Verformung einen vorgegebenen Wert nicht überschreitet, z.B. 0,2%. Er wird wie in Abb.8.4 dargestellt graphisch ermittelt.

Hookesches Gesetz. Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve.

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Poisson Zahl. Verhältnis von Querkontraktion zu Längendehnung im elastischen Bereich.

$$\mu = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l}$$

Tab. 8.1 Elastische Eigenschaften und Schmelztemperatur ausgewählter Materialien

Material	T _s /°C	E/GPa	μ
Pb	327	13,8	0,45
Mg	650	44,8	0,29
Al	660	69,0	0,33
Cu	1085	124,8	0,36
Fe	1538	206,9	0,27
W	3410	408,3	0,28
Al ₂ O ₃	2020	379,3	0,26
Si ₃ N ₄		303,4	0,24

8.2 Biegeversuch für spröde Materialien

Der Zugversuch eignet sich nur bedingt für sehr spröde Materialien, da diese schon beim Einspannen brechen können.

Für solche Materialien kann der Biegeversuch angewendet werden, um das Zugverhalten zu bestimmen. Hieraus können Elastizitätsmodul und Biegefestigkeit (Analogon zur Zugfestigkeit) bestimmt werden.

Spröde Materialien eignen sich gut für Anwendungen, bei denen sie einer Kompression ausgesetzt sind, weil sich Sprünge und Risse bei dieser Beanspruchung zusammenschließen. Ihre Druckfestigkeit ist deshalb sehr viel größer als ihre Zugfestigkeit. Spröde Materialien sind schwer einzuspannen. Daraus ergeben sich Schwierigkeiten diese mittels Zugversuch zu prüfen.

Die aus dem vorangegangenen Kapitel bekannten Begriffe Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul sind mit den hier verwendeten Größen Biegefestigkeit und Biegemodul vergleichbar.

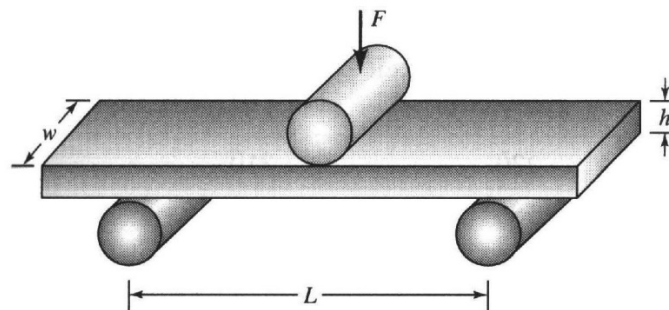


Abb. 8.5 Biegeversuch zur Bestimmung der Festigkeit spröder Materialien

Biegeversuch. Prüfverfahren, bei dem eine zweiseitig gelagerte Probe in der Mitte zwischen den Auflagern belastet wird, um das Widerstandsvermögen des Materials gegen statische oder langsam ansteigende Belastung zu ermitteln.

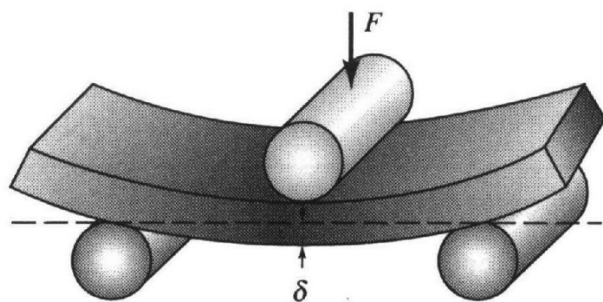


Abb. 8.6 Durchbiegung durch Biegebelastung

Biegefestigkeit. Zum Bruch führende Spannung beim Biegeversuch. Auch als Bruchmodul bezeichnet.

Biegemodul. Elastizitätsmodul, abgeleitet aus den Ergebnissen des Biegeversuchs. Entspricht der Steigung der Spannungs-Durchbiegungs-Kurve.

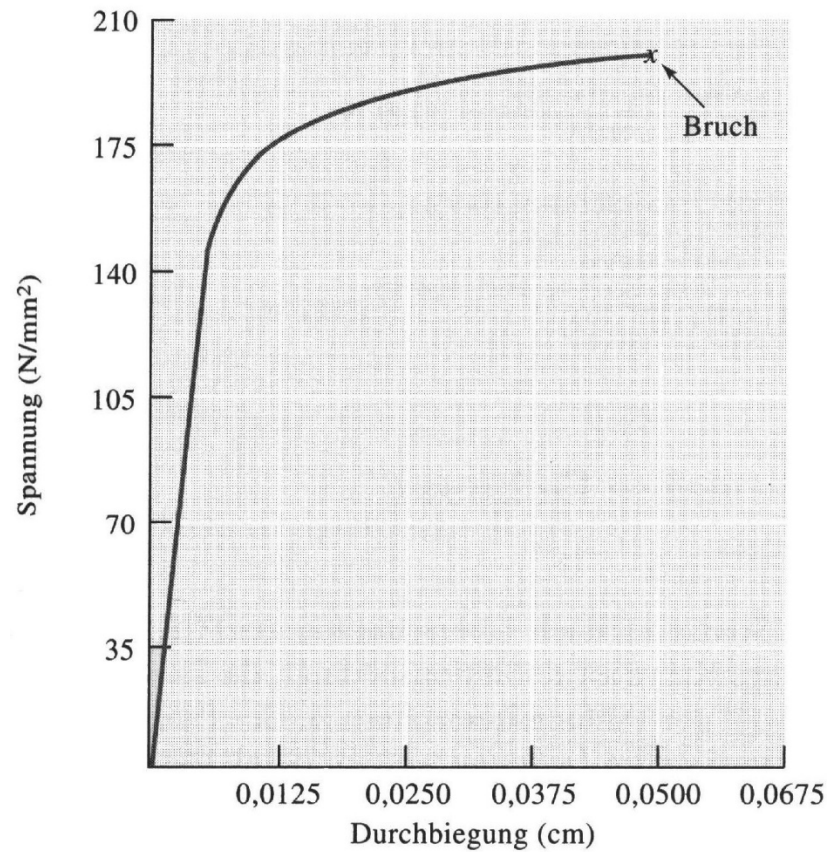


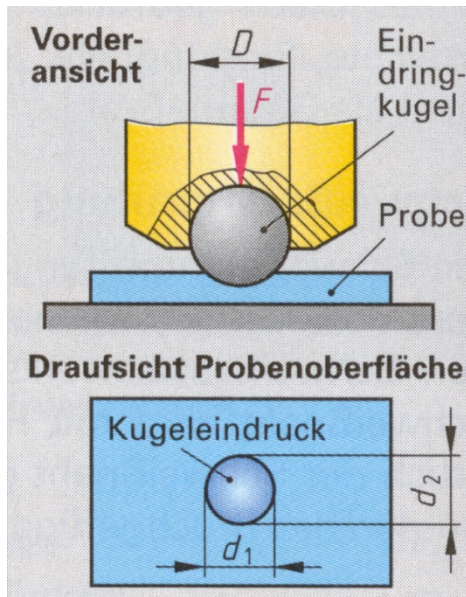
Abb. 8.7. Spannungs - Biegungskurve von MgO

8.3 Härteprüfung

Härte ist der mechanische Widerstand, den ein Werkstoff der mechanischen Eindringung eines anderen Körpers in die Oberfläche entgegensetzt.

Die Härteprüfung gibt Auskunft über das Widerstandsvermögen gegenüber Eindrücken und die Verschleiß- und Abriebbeständigkeit. Zu der Vielzahl gebräuchlicher Prüfverfahren zählen die Methoden von Vickers, Rockwell und Brinell. Die Härte korreliert häufig mit anderen Materialeigenschaften, z.B. mit der Zugfestigkeit.

Härteprüfung nach Brinell



Beispiel einer Härteangabe nach Brinell				
229 HBW 2,5 / 187,5 / 30				
Härte- wert	Härte nach Brinell (Hart- metallkugel)	Prüfkugel- durch- messer in mm	Prüfkraft $F = 187,5 \cdot$ $9,81 \text{ N}$ $= 1839 \text{ N}$	Einwirk- dauer in Sekunden

Abb. 8.8 Härteprüfung nach Brinell

Bei der Härteprüfung nach Brinell wird eine Kugel aus Hartmetall oder gehärtetem Stahl mit einer Prüfkraft in die Probe eingedrückt und der Durchmesser des entstandenen Kugeleindrucks gemessen.

Die **Brinellhärte HB** kann aus der Prüfkraft F und der Oberfläche des Kugeleindrucks in der Probe berechnet werden.

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{\text{Oberfläche des Kugeleindrucks}} \quad F = \text{Prüfkraft in N}$$

$$\text{Oberfläche des Kugeleindrucks} = \frac{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})}{2}$$

$D = \text{Durchmesser der Kugel}$

$d = \text{mittlerer Kugeleindruckdurchmesser}$

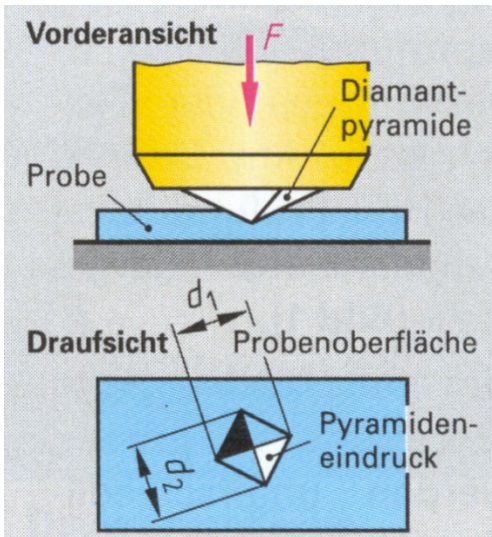
Der Kugeleindruckdurchmesser d wird durch Mittelwertbildung aus d_1 und d_2 berechnet:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2}$$

In der Praxis wird der Härtewert HB mit der Prüfkraft F und dem Eindruckdurchmesser d aus Tabellen abgelesen, die der Härteprüfmaschine beigegeben sind.
Die Prüfkraft wird an der Maschine eingestellt.

Mit der Brinellhärteprüfung können nur weiche bis mittelharte Werkstoffe geprüft werden.

Härteprüfung nach Vickers



Beispiel einer Härteangabe nach Vickers			
210 HV 50 / 30			
Härte- wert	Härte nach Vickers	Prüfkraft $F = 50 \cdot 9,81 \text{ N}$ $= 490,5 \text{ N}$	Einwirk- dauer in Sekunden

Abb. 8.9 Härteprüfung nach Vickers

Bei der Härteprüfung nach Vickers wird die Spitze einer vierseitigen Pyramide aus Diamant (Spitzenwinkel 136°) in die Probe eingedrückt und die Diagonalen des entstandenen Pyramideneindrucks gemessen.

Die Vickershärte errechnet sich aus der Prüfkraft F in N und der Pyramideneindruckdiagonalen d in mm nach der Formel:

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2}$$

Die Diagonale d bestimmt man durch Ausmessen der beiden Diagonalen d_1 und d_2 des Eindrucks und Bildung des Mittelwertes.

Mit diesem Prüfverfahren sind Materialien von ganz weich bis ganz hart Prüfbar.

Härteprüfung nach Rockwell

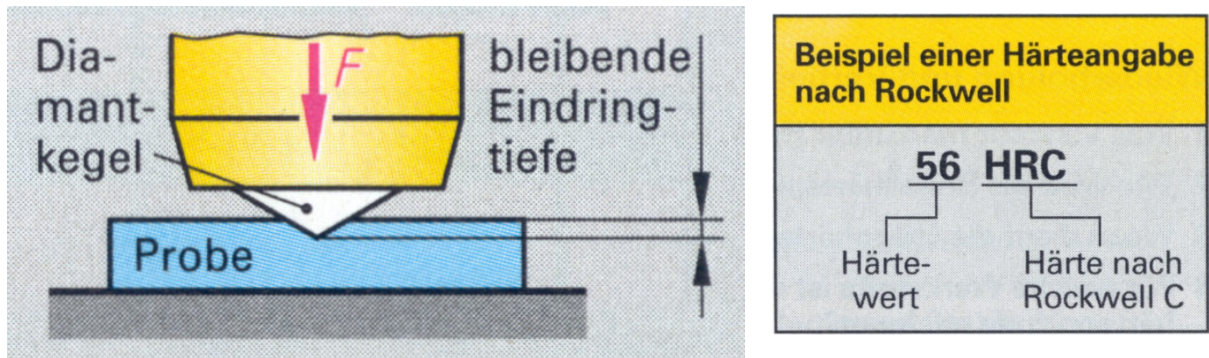


Abb. 8.10 Härteprüfung nach Rockwell

Bei den Härteprüfungen nach Rockwell wird ein kegel- oder kugelförmiger Prüfkörper zunächst mit der Prüfvorkraft (98 N) belastet und die Messuhr auf 0 gestellt. Danach wird die eigentliche Prüfkraft (z.B. 1373 N beim HRC-Verfahren) aufgelegt und nach kurzer Zeit wieder weggenommen. Die bleibende Eindringtiefe h des Prüfkörpers kann an der Messuhr direkt als Rockwellhärte abgelesen werden.

Für harte Werkstoffe verwendet man als Prüfkörper einen Diamantkegel mit einem Spitzenwinkel von 120° (z.B. HRC- und HRA-Verfahren).

Weiche Werkstoffe werden mit einer gehärteten Stahlkugel von $1,59\text{ mm}$ oder $3,175\text{ mm}$ Durchmesser geprüft (z. B. HRB- und HRF-Verfahren).

Um verschieden harte Werkstoffe zu prüfen, werden unterschiedliche Prüfkraften eingesetzt.

Beispiele:

HRC: $F = 1373\text{ N}$; HRA: $F = 490,3\text{ N}$; HRB: $F = 882,6\text{ N}$; HRF: $F = 490,3\text{ N}$

Das Prüfverfahren nach Rockwell ist sehr verbreitet, da mit diesem Verfahren Bauteile in schneller abfolge geprüft werden können. Dieser Zeitgewinn ist in der Industrie gern gesehen.

8.4 Schlagprüfung

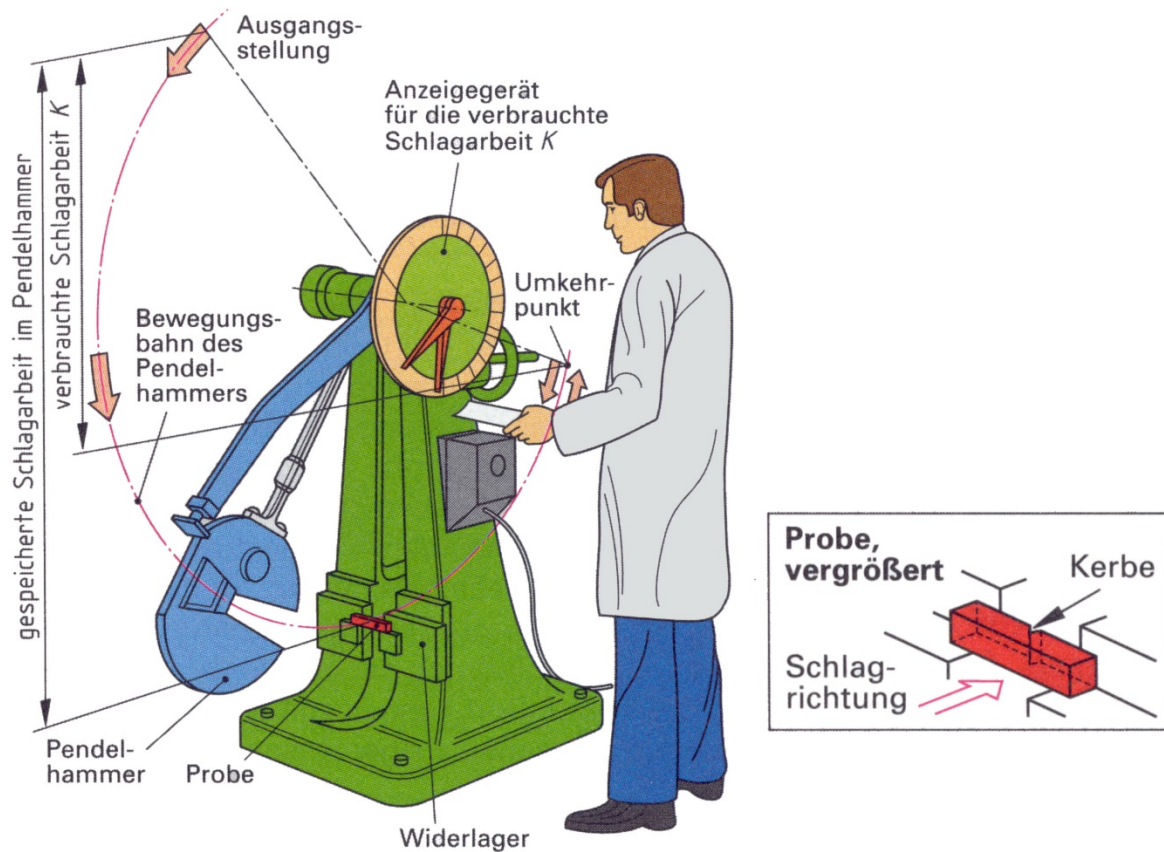


Abb. 8.11 Kerbschlagbiegeversuch

Der Schlagversuch beschreibt das Materialverhalten bei schnell einwirkender Belastung. Als Kennwert wird die beim Bruch aufgebrauchte Energie gemessen. Sie dient als Basis für Werkstoffvergleiche.

Schlagenergie. Energie, die beim Schlagversuch für einen Probenbruch aufzuwenden ist.

Zähigkeit. Qualitative Kenngröße für das Schlagverhalten von Materialien. Werkstoffe mit großer Widerstandsfähigkeit gegenüber Schlageinwirkung (bruchresistent) nennt man zäh.

Übergangstemperatur. Temperatur unterhalb derer sich Materialien beim Schlagversuch spröde verhalten.

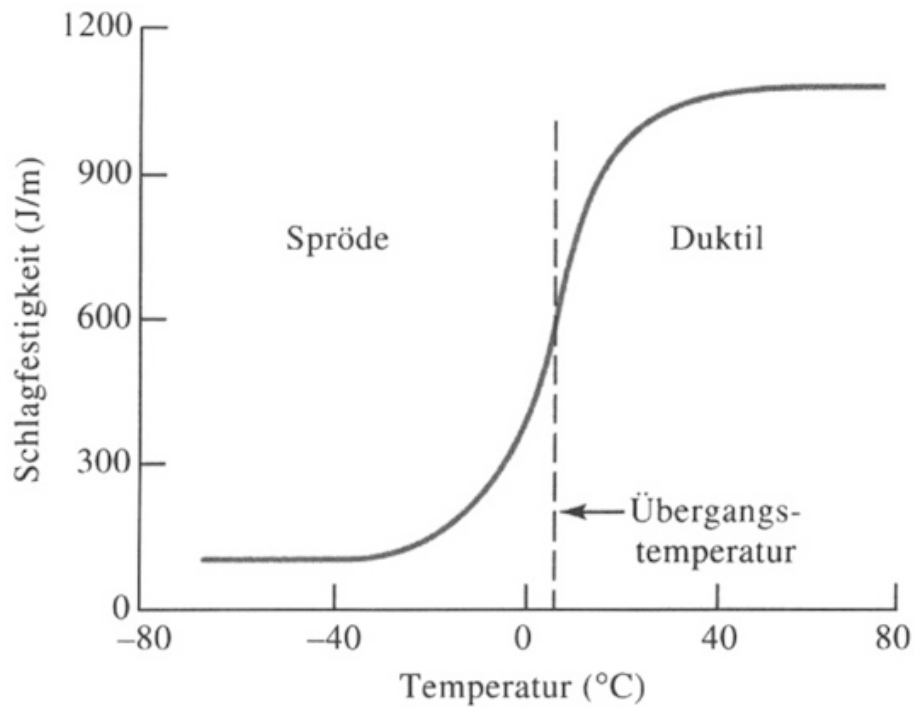


Abb. 8.12 Ermittlung der Übergangstemperatur aus einer Schlagversuchsserie bei einem kubisch raumzentrierten Stahl

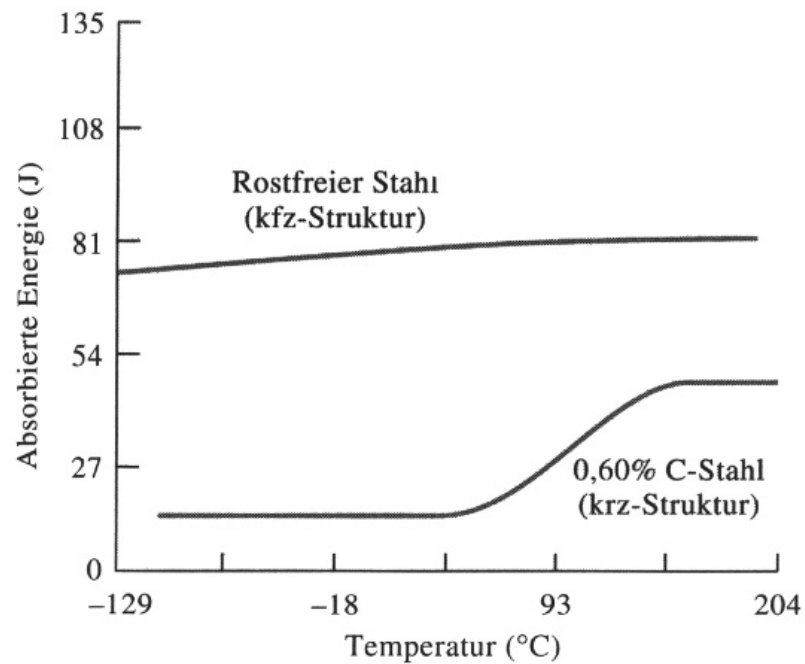


Abb. 8.13 Vergleich der Zähigkeiten von kubisch flächenzentriertem und kubisch raumzentrierten Stahl.

8.5 Bruchmechanik

Die Bruchmechanik ist ein Arbeitsgebiet, das sich mit dem Verhalten von sprung- und rissbehafteten Festkörpern befasst. Fehler dieser Art sind praktisch in allen Materialien vorhanden. Als Bruchzähigkeit bezeichnet man die maximale Spannungsbelastung, der ein Werkstoff bei einer bestimmten Rissgeometrie noch widerstehen kann. Im Gegensatz zu den Ergebnissen der Schlagprüfung ist die Bruchzähigkeit eine quantitative Materialeigenschaft.

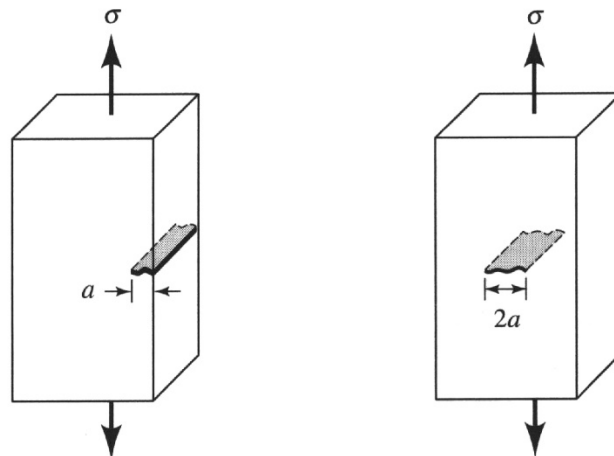


Abb. 8.14 Belastung einer rissbehafteten Probe

Die Bruchzähigkeit kann aus einem Zugversuch ermittelt werden. Die zugehörigen Proben enthalten Risse bekannter Größe und Geometrie, an denen sich die einwirkende Spannung verstärkt (die Risse wirken als Spannungsverstärker). Der geometrische Zusammenhang wird durch den Spannungsintensitätsfaktor K beschrieben. Dieser beträgt für die dargestellte Versuchsbedingung:

$$K = f\sigma\sqrt{\pi a}$$

Wobei f einen für Probe und Riss charakteristischen Geometriefaktor, σ die anliegende Spannung und a die Risstiefe bedeuten. Wenn für die Probe eine „unendliche“ Breite angenommen wird, beträgt $f = 1,0$.

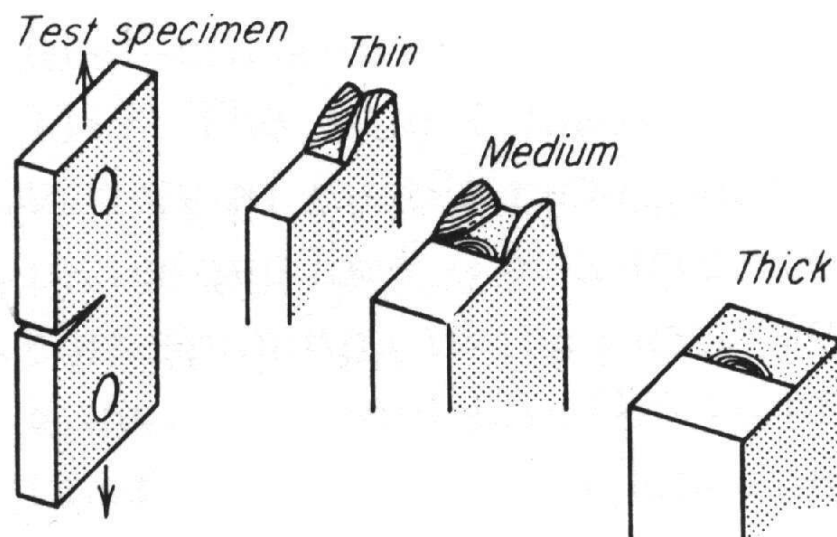


Abb. 8.15 Bruchbilder rissbehafteter Proben

Die Bruchzähigkeit hängt von der Probendicke ab: Mit zunehmender Probendicke verringert sich die Bruchzähigkeit auf einen konstanten Wert K_{IC} . Er stellt die untere Grenze der Bruchzähigkeit dar (auf ebenen Spannungszustand bezogene Bruchzähigkeit) und wird allgemein als Werkstoffkenngröße verwendet. Die Tabelle vergleicht K_{IC} -Werte einiger Werkstoffe mit den Werten ihrer Streckgrenze. Maßeinheit der Bruchzähigkeit ist $MPa\sqrt{m}$.

K_C = K-Wert, erforderlichlich für Rissausbreitung.

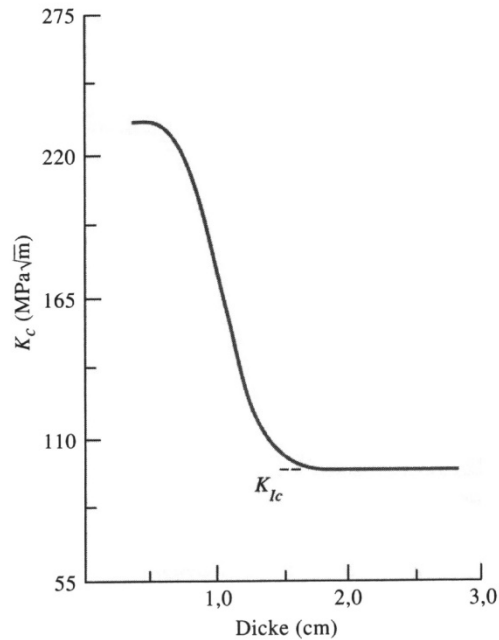


Abb. 8.17 Bruchzähigkeit als Funktion der Probendicke

Tab. 8.1 Auf ebene Verformung bezogene Bruchzähigkeit K_{IC} ausgewählter Materialien

Material	Bruchzähigkeit $K_{IC} / MPa\sqrt{m}$	Streckgrenze MPa
Al-Cu-Legierung	25	455
	35	325
Ti(6%)-Al(4%)-V	55	900
	100	860
Ni-Cr-Stahl	50	1640
	90	1420
Al_2O_3	1,8	205
Si_3N_4	5,0	550
ZrO_2	11	415
Si_3N_4 -SiC Verbund	56	830
Polymthylmethacrylat (PMMA)	1,0	28
Polycarbonat (PC)	3,3	56

Das Widerstandsvermögen von Werkstoffen gegenüber Rissausbreitung wird durch mehrere Faktoren beeinflusst:

1. Einfluss der Risttiefe. Mit zunehmender Risttiefe verringert sich die Spannungsbelastbarkeit des Materials. Deshalb werden Technologien bevorzugt, mit denen sich Risttiefen einschränken lassen. Hierzu gehören z.B. die Ausfilterung von Verunreinigungen aus Metallschmelzen und Warmpressverfahren für die Herstellung keramischer Bauteile aus Pulverförmiger Ausgangssubstanz.
2. Einfluss der Verformbarkeit. In duktilen Metallen kann sich das Material am Rissende verformen, so dass dieses Ende stumpf wird. Dadurch verringert sich der Spannungsintensitätsfaktor, das weitere Anwachsen des Risses wird verhindert. Festigkeitszunahme von Metallen Abnahme ihrer Duktilität und führt zur Verminderung ihrer Bruchzähigkeit. Spröde Materialien wie keramische und viele polymere Stoffe haben geringere Bruchzähigkeit als Metalle.
3. Einfluss der Körperform. Die Bruchzähigkeit dicker Körper ist geringer als die von dünnen.
4. Einfluss der Stoßgeschwindigkeit. Schnellere Krafteinwirkung, wie sie bei Schlagversuchen auftritt, hat im Allgemeinen kleinere Bruchzähigkeit zur Folge.
5. Einfluss der Temperatur. Temperaturzunahme vergrößert gewöhnlich die Bruchzähigkeit.
6. Einfluss der Struktur. Feinkörniges Gefüge erhöht im Allgemeinen die Bruchzähigkeit, während Punktdefekte und Versetzungen sie vermindern. Feinkörnige Keramik besitzt hohes Widerstandsvermögen gegenüber Risswachstum.

8.6 Schwingversuch

Der Dauerschwingversuch (Ermüdungstest) dient zur Ermittlung des Materialverhaltens bei zyklischer Beanspruchung. Wichtige Eigenschaften sind die Dauerschwingfestigkeit (maximale Spannung, bis zu der kein Ausfall stattfindet), die Zeitschwingfestigkeit (maximale Spannung, bis zu der eine bestimmte Zykluszahl nicht zum Ausfall führt) und die Ermüdungslebensdauer (Anzahl der zulässigen Belastungszyklen bei vorgegebener Spannung).

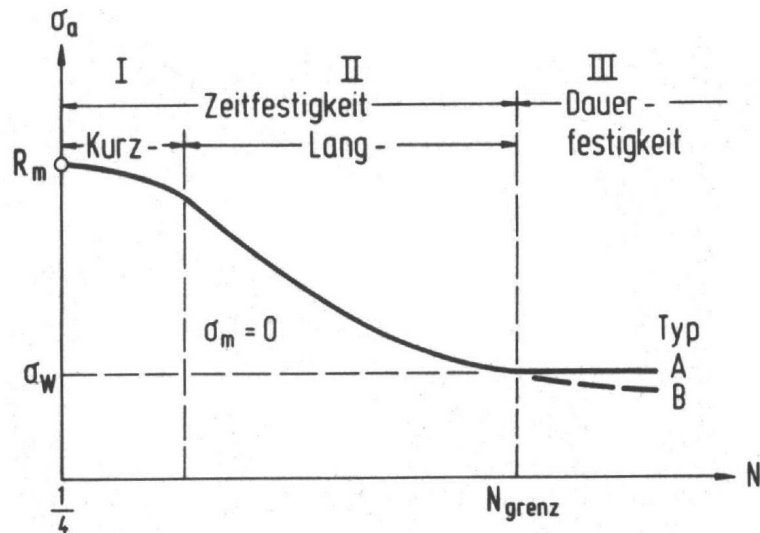


Abb. 8.18 Wöhlerkurve

Wöhlerkurve (SN-Kurve). Belastungsdiagramm, in dem die Spannungsamplitude über der bis zum Bruch führenden Zykluszahl aufgetragen wird.

Dauerschwingverhältnis. Verhältnis der Dauerschwingfestigkeit zur Zugfestigkeit eines Materials. Das Verhältnis beträgt bei Eisenmetallen ungefähr 0,5.

$$\text{Dauerschwingverhältnis} = \frac{\text{Dauerschwingfestigkeit}}{\text{Zugfestigkeit}} \approx 0,5$$

Das Dauerschwingverhältnis erlaubt Abschätzungen des Ermüdungsverhaltens aus dem Zugversuch.

Die meisten Werkstoffe erweisen sich als kerbempfindlich, d.h. ihr Ermüdungsverhalten hängt in starkem Maße von Oberflächenrissen ab. Risse, die sich oft durch Konstruktions- oder Bearbeitungsfehler ergeben können, bewirken Spannungserhöhungen und vermindern bei konstanter Krafteinwirkung die Dauerschwingfestigkeit, die Zeitschwingfestigkeit oder die Ermüdungslebensdauer. Aus diesem Grunde werden häufig Oberflächenpolituren vorgenommen, um auf diese Weise die Gefahr von Ermüdungsbrüchen zu senken.

Ermüdungsbruch. Bruch durch zyklische Belastung unterhalb der Streckgrenze.

8.7 Zerstörungsfreie Materialprüfverfahren

Eine Anzahl zerstörungsfreier Methoden wie Härte- oder Zuverlässigkeitstest dienen zur Qualitätskontrolle von Werkstücken. Besondere Beachtung verdienen Verfahren, die es ermöglichen, Vorhandensein, Ort und Größe potentiell gefährlicher Materialfehler festzustellen.

In bestimmten Fällen kann auch die Härteprüfung zerstörungsfrei sein. Wenn man beispielsweise Brückenträger prüft, kann das Bauteil nach der Prüfung verwendet werden. Die Eindruckstelle verändert die mechanischen Eigenschaften des Großen träger nicht merklich.

8.7.1 Zuverlässigkeitstest

In vielen Fällen lässt sich ein Zuverlässigkeitstest durchführen. Dabei belastet man eine Probe bis zur zulässigen Grenze und kontrolliert, ob sie intakt bleibt. Wenn eine betriebsbedingte starke Abnutzung der Probe ausgeschlossen ist und die Prüflast nicht überschritten wird, kann man die Zuverlässigkeit der Probe als gesichert betrachten.

8.7.2 Radiographie, Röntgendurchstrahlung

Radiographie beruht darauf, dass Röntgenstrahlen in Fehlerstellen oder unterschiedlichen Materialien unterschiedlich stark absorbiert werden.

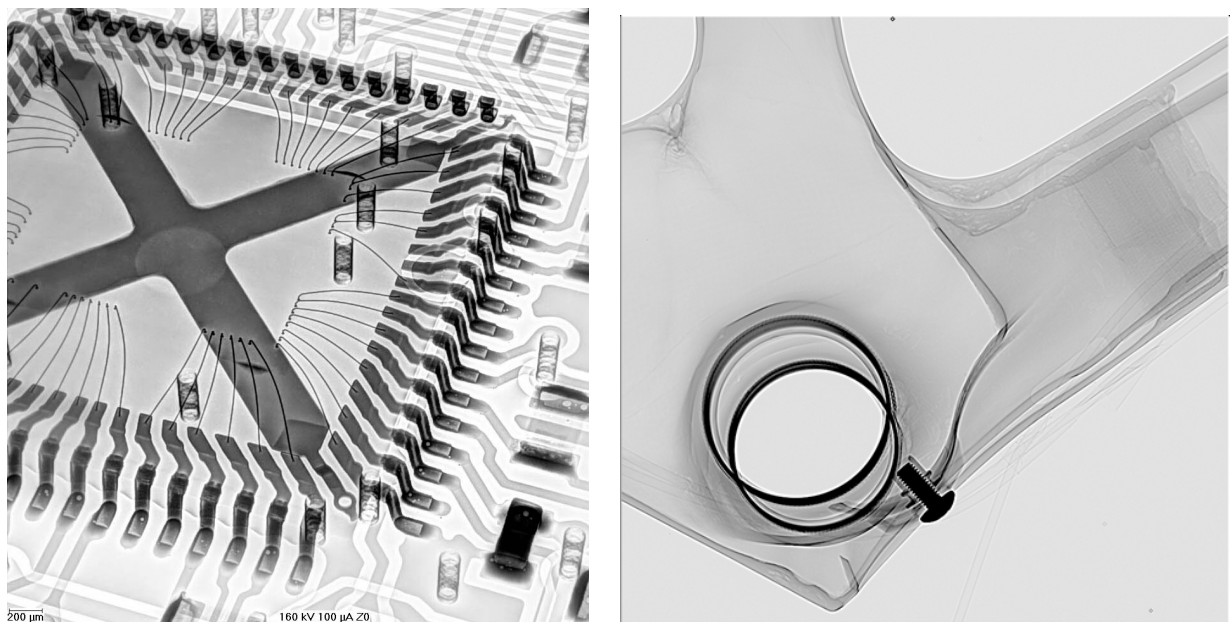


Abb. 8.19 Bauteileuntersuchung mit Hilfe von Röntgendurchstrahlung

Die Auflösung moderner Röntgendurchstrahlungsanlagen liegt bei etwa 25 µm.

8.7.3 Ultraschalluntersuchung

Mit Ultraschall lassen sich Größe und Lage von Materialfehlern bestimmen. Das Verfahren beruht auf Reflexion oder Schwächung hochfrequenter Schallwellen.

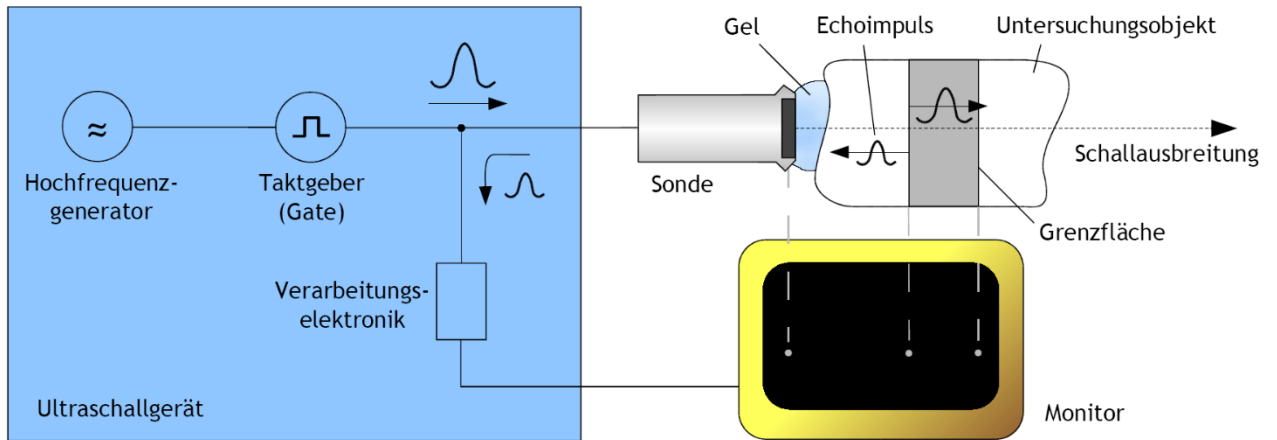


Abb 8.20 Prinzip der Ultraschalluntersuchung

Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in ausgewählten Stoffen

Material	Geschwindigkeit Km/s	Elastizitätsmodul N/mm ²	Dichte g/cm ³
Al	6,25	72	2,70
Cu	4,62	110	8,96
Pb	1,96	17	11,34
Mg	5,77	46	1,74
Ni	6,02	207	8,90
Ni(60%)-Cu(40%)	5,33	179	8,90
Ag	3,63	75	10,49
Rostfreier Stahl	5,74	197	7,91
Sn	3,38	55	7,30
W	5,18	406	19,25
Luft	0,33	-	0,0013
Glas	5,64	72	2,32
Polyethylen	1,96	1,20	0,90
Quarz	5,74	69	2,65
Wasser	1,50	-	1,00

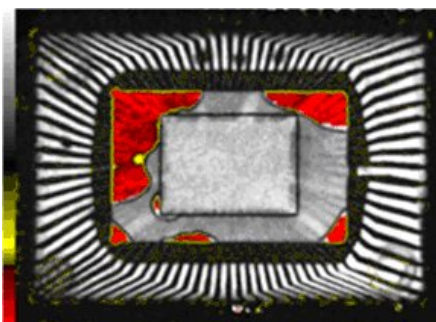


Abb. 8.21 Bild eines Ultraschallmikroskopes

8.7.4 Magnetpulverprüfung

Die Magnetpulverprüfung, ist ein Verfahren zum Nachweis von Rissen in oder nah (0,5 mm) der Oberfläche ferromagnetischer Werkstoffe. Das Verfahren beruht auf der Störung des magnetischen Flusses durch Fehlerstellen an oder nahe der Oberfläche.

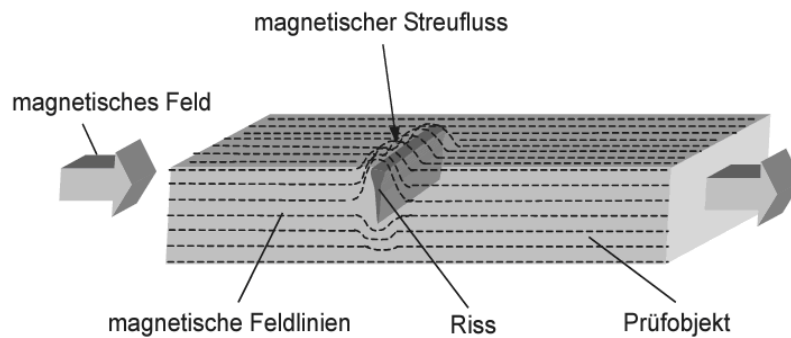


Abb. 8.22 Störung des magnetischen Flusses an der Oberfläche eines Rissbehafteten Materials



Abb. 8.23 Untersuchung einer Schweißnaht auf Risse mit Hilfe der Magnetpulverprüfung

Sichtbar gemacht werden die Risse, indem eine Flüssigkeit, mit magnetischen Partikeln aufgebracht wird, die unter UV Licht fluoresziert.



Abb. 8.24 Sichtbarmachung der Risse in einem Zahnrad

8.7.5 Farbeindringtest

Diskontinuitäten, wie Risse an einer Materialoberfläche, können mit der Penetrationsmethode (oder Farbeindringtest) nachgewiesen werden, die darauf beruht, dass Farblösungen infolge der Kapillarwirkung in sonst unsichtbare Risse eindringen. Die Methode umfasst vier Schritte. Die Oberfläche muss zunächst sorgfältig gereinigt werden. Danach wird eine Farbflüssigkeit aufgesprüht, die man eine Zeitlang einwirken lässt, damit sie in Risse eindringen kann. Nach dem Entfernen von Farbstoffresten von der Oberfläche erfolgt als letzter Schritt das Aufsprühen eines Entwicklers. Es kommt zu einer chemischen Reaktion mit der eingedrungenen Indikatorlösung, die dabei aus den Rissen austritt und durch intensive Farbeffekte oder durch Fluoreszenz in ultraviolettem Licht die Fehlerstellen sichtbar macht.

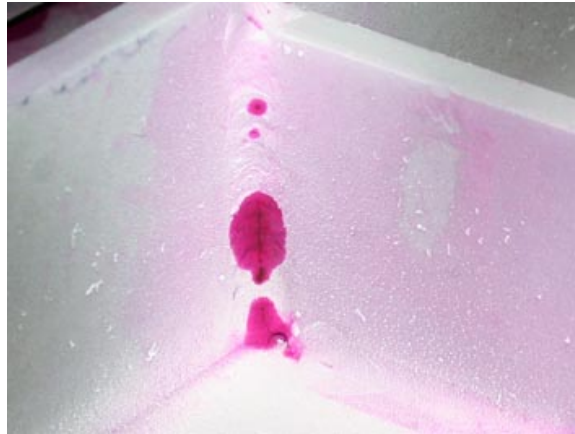


Abb. 8.25 Farbeindringtest an einem Rissbehafteten Werkstückes