

M03 E-Modul und Materialprüfung

H. Bender, Fachhochschule Oldenburg / Ostfriesland / Wilhelmshaven, Fachbereich Technik, Abteilung Photonik

Doc. 23. Januar 2002

1.1 Einführung

1.1.1 Ziel des Versuchs

Die Werkstoffprüfung zählt zum Lehrgebiet Werkstoffkunde. Sie dient der Ermittlung von Daten über Eigenschaften eines Werkstoffes. Die Vorgehensweise bei der Datenermittlung ist in vielen Staaten durch internationalen Normen (ISO seit 1946) und in nationalen, die sich an den ISO-Normen orientieren (DIN, ASTM; ...) vereinheitlicht. Hierin werden auch die Probenabmessungen und die äußeren Prüfbedingungen festgelegt. Die Aufgaben der Werkstoffprüfung im Laboratorium, im Materialeingang, während der Fertigung und in der Endkontrolle von Fertigteilen lassen sich in zwei Aufgabenbereiche einteilen:

- Werkstoffeigenschaften mit Hilfe von Kenngrößen definieren und somit die Verwendbarkeit von Werkstoffen festlegen
- Werkstofffehler rechtzeitig feststellen und Versagensursachen an zerstörten Teilen aufdecken.

Durch die große Anzahl von Werkstoffen und deren vielseitigen Einsatz sind eine große Anzahl Prüfverfahren entwickelt worden, die sich in folgende Hauptgruppen der Werkstoffprüfung einteilen lassen:

- Mechanisch-technologische Untersuchungen
- Zerstörungsfreie Werkstoffuntersuchungen
- Metallographische Untersuchungen
- Chemisch-technische Untersuchungen und Prüfungen

In den mechanisch-technologische Untersuchungen werden mit Hilfe unterschiedlichster Maschinen und Geräte Werkstoffproben zerstört und der Zerstörungsverlauf oder das Verhalten bei der Zerstörung als Kriterium bei der Beurteilung herangezogen. Zu diesen Untersuchungen zählen Zug-, Druck-, Biege- und Verdrehversuche, Härtemessungen, Schlagversuche, dynamische Dauerschwingversuche und technologische Untersuchungen. Die Versuche werden als technologisch bezeichnet, wenn die verwendete Kraft nicht zur Beurteilung hinzugezogen wird.

1.1.2 Problemstellung

Ein Kriterium von Interesse ist die Festigkeit eines Bauteils und damit die des Werkstoffs. Als Festigkeit wird der Widerstand eines Werkstoffs gegen Versagen bei Beanspruchung bezeichnet, wobei die Art des Versagens je nach Beanspruchungsart deutlich unterschiedlich sein kann. Zur Beschreibung der Festigkeit hat sich die Unterscheidung der vielfältigen Versagenserscheinungen in drei Gruppen bewährt:

- Versagen durch unzulässige bleibende Verformung
- Versagen durch Ausbreiten von Rissen
- Versagen durch Abtragen von Oberflächen

Ausgewählte Versuche zu den Versagensgruppen unzulässige bleibende Verformung und Ausbreitung von Rissen sind Zugversuch, Druckversuch, Härteprüfung. Aus diesen einfachen Versuchen lassen sich eine Fülle von Aussagen gewinnen. Sie sind Gegenstand des Praktikums.

1.1.3 Aufgabenstellung

- Bestimmung des Elastizitätsmoduls (E-Moduls) zweier Metallstäbe mittels Durchbiegung.
- Zerreißen von genormten metallischen Zugproben mit dem Materialprüfgerät und anschließender Auswertung der Messung.

1.1.4 Hinweis

Das Materialprüfgerät nicht vor erfolgter Einweisung in Betrieb nehmen. Bei Betrieb des Gerätes sind die entsprechenden Sicherheitshinweise genau zu beachten um Unfälle zu vermeiden.

1.2 Theorie

Mechanische Beanspruchung von Metallen sind größtenteils Zug-, Druck- oder Scherbelastungen. Betrachten wir hierbei nur die für unseren Versuch wichtigen Zugbelastungen, ist festzustellen, daß ein Metall bis zu einem gewissen Maß gedehnt werden kann, wobei es nach Wegnahme der Belastung in seine Ursprungsform zurückkehrt (elastisches Verhalten). Erhöht man die Belastung weiter, dehnt sich das Material weiter, kehrt aber nach Entfernen der Belastung nicht mehr in die Ursprungsform zurück (plastisches Verhalten). Wird die Belastung noch weiter erhöht, zerreißt das Material. Diese drei Grenzen sind wichtige Materialkonstanten, welche im technischen Einsatz berücksichtigt werden müssen.

1.2.1 Definition des Elastizitätsmoduls

Wird ein Zugstab der Länge L_0 und dem Durchmesser D_0 wie in Abb.(1.1) mit einer Kraft F belastet, so verlängert er sich um den Betrag $\Delta L = L - L_0$. Die Verlängerung ΔL ist proportional zur angreifenden Kraft und reziprok

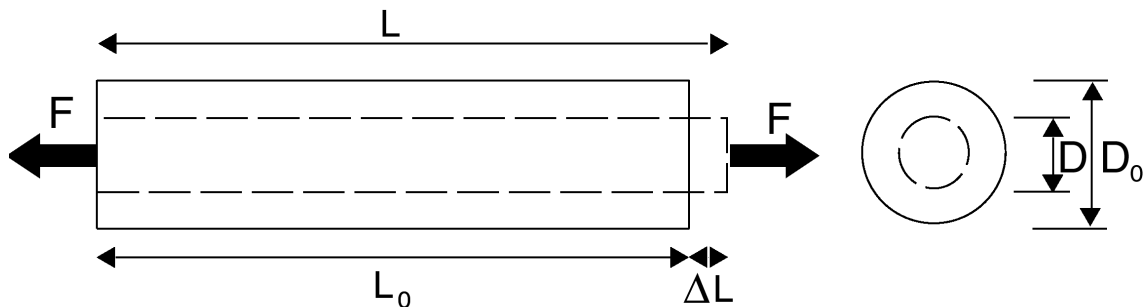


Abbildung 1.1: Abmessungsänderung eines zylindrischen Stabs bei Zugbeanspruchung

proportional zum Querschnitt des Stabes. Somit gilt:

$$\Delta L = \frac{L}{E \cdot A} \cdot F \quad (1.1)$$

Setzt man für $\frac{F}{A} = \sigma$ (Spannung) und für $\frac{\Delta L}{L} = \epsilon$ (Dehnung) ein, erhält man das Hooksche Gesetz

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad (1.2)$$

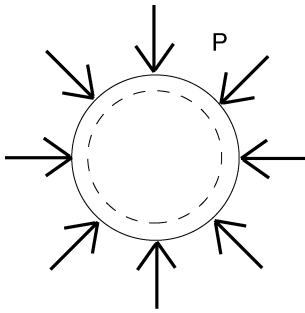
1.2.2 Belastungsfälle

Querkontraktion

Wie Abb.(1.1) zeigt, ändert sich der Durchmesser des Stabes bei der Verlängerung vom Durchmesser D_0 auf den Durchmesser D . Das Verhältnis der relativen Querschnittsänderung zur relativen Längenänderung bezeichnet man als Poissonsche Zahl oder Querkontraktionszahl. Diese Materialkonstante liegt für die meisten technisch genutzten Werkstoffe zwischen 0.2 und 0.5. Es gilt:

$$\mu = \frac{\frac{\Delta D}{D}}{\frac{\Delta L}{L}} \quad (1.3)$$

Kompression



Setzt man einen Körper einem gleichmäßigen Druck aus, so behält er seine geometrische Gestalt bei. Die Volumenänderung ist jedoch bei dieser dreidimensionalen Belastung dreimal so groß wie bei der eindimensionalen Belastung. Innerhalb des elastischen Bereichs gilt:

$$p = -K \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (1.4)$$

Hierbei ist K das Kompressionsmodul.

Abbildung 1.2: Kompression eines Körpers

Schub- und Scherung

Eine Schub- oder Scherkraft wirkt tangential zur Ebene, an der sie angreift. Sie bewirkt eine Scherung bzw. eine Kippung um den Winkel γ . Dieser Winkel ist der, je Flächeneinheit wirkenden Schubkraft und der hierbei auftretenden Schubspannung τ , proportional. Es gilt:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (1.5)$$

Diese Proportionalität gilt für kleine Winkel. Zu beachten ist hierbei, daß der Schubmodul G nicht den gleichen Betrag hat, wie das Elastizitätsmodul E desselben Werkstoffs.

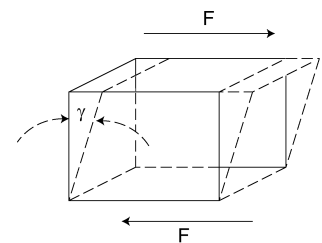


Abbildung 1.3: Deformation eines Würfels

1.2.3 Das Hooksche Gesetz

Im Bereich der linearen elastischen Verformung gilt das Hooksche Gesetz: „Elastische Spannungen und Verformungen sind einander proportional“. Die Proportionalitätsfaktoren für die eindimensionale Dehnung Gl.1.2, die Kompression Gl.1.4 und die Scherung Gl.1.5 sind der Elastizitäts-, Kompressions- und Schubmodul. Diese sind Werkstoffkonstanten, welche das elastische Verhalten isotroper Werkstoffe beschreiben. Zwischen den Konstanten gelten folgende Beziehungen:

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\mu)} \quad (1.6)$$

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.7)$$

$$\frac{E}{3} < G < \frac{E}{2} \quad (1.8)$$

1.2.4 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

Beim Zugversuch wird ein Probekörper gleichmäßig und stoßfrei gedehnt, bis er zerreißt. Dabei kann das Verhalten des Werkstoffs bei stetig zunehmender Zugbeanspruchung σ , die gleichmäßig über den Probenquerschnitt der belasteten Probe verteilt ist, beobachtet werden. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Werkstoffs weist typische Punkte auf: Den Bereich zwischen 0 und R_p bezeichnet man als Hooksche Gerade. In diesem Bereich ist die Spannung proportional zur Dehnung ϵ . Wird ein Werkstoff in diesem Bereich belastet, treten keine bleibenden Verformungen auf. Wird der Werkstoff größeren Spannungen ausgesetzt, so kommt es zu plastischen Verformungen und schließlich zum Bruch.

1.2.5 Durchbiegung eines Balkens

Wird auf einen zweifach gelagerten Stab mit rechteckigem Querschnitt A eine Kraft F ausgeübt, so erfahren die einzelnen Fasern des Stabes eine Längenänderung. Im oberen Teil des Balkens wird das Material zusammengedrückt, im unteren Teil auseinandergezogen.

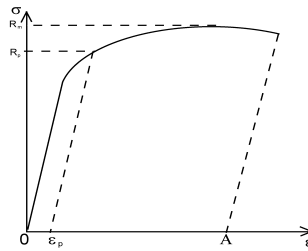


Abbildung 1.4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm

In der Mitte befindet sich die neutrale Faser. Berücksichtigt man nur den Einfluß der Biegemomente M auf die Krümmung des Balkens und vernachlässigt den Einfluss der Querkräfte, so ist die neutrale Faser die Biegelinie. Das Hooksche Gesetz für den einachsigen Spannungszustand lautet:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{1}{E} \cdot \frac{M_b}{J} \quad (1.9)$$

Das Biegemoment M ist für einen Balken mit der Einzellast F in der Mitte:

$$M_b(x) = \frac{F}{2}x; \quad \text{mit } 0 < x \leq \frac{\ell}{2} \quad (1.10)$$

wobei ℓ die Länge des Balkens zwischen den Aufhängepunkten sei. Das axiale Trägheitsmoment J erhält man für einen rechteckigen Querschnitt aus der Höhe h und der Breite b über:

$$J = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (1.11)$$

Für die Krümmungslinie des Balkens gilt:

$$\frac{y''}{(1 + y'^2)^{\frac{3}{2}}} = k = -\frac{M_b}{E \cdot J} = \frac{1}{r} \quad (1.12)$$

Da $y'^2 \ll 1$ gilt:

$$y'' \approx -\frac{M_b}{E \cdot J} \quad (1.13)$$

Die Dehnung ϵ beträgt:

$$\epsilon = \frac{\Delta ds}{ds} = \frac{r \cdot d\varphi}{ds} \quad (1.14)$$

Um die Steigung der Biegelinie zu erhalten wird 1.10 in 1.13 eingesetzt und integriert. Hieraus ergibt sich:

$$y' = -\frac{F \cdot s^2}{4 \cdot E \cdot J} + c_1 \quad (1.15)$$

Da $y'(x = \frac{\ell}{2}) = 0$ ist, folgt $c_1 = 0$. Somit ist

$$y' = \tan \alpha = \frac{F \cdot \ell^2}{16 \cdot E \cdot J} \quad (1.16)$$

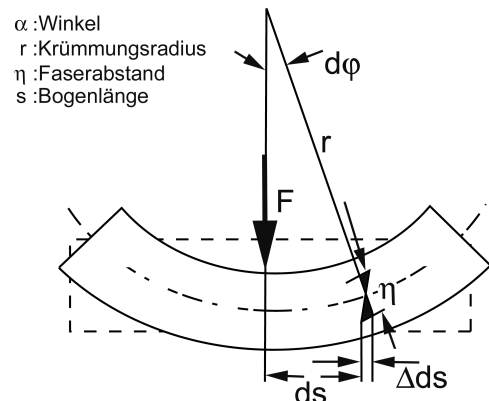


Abbildung 1.5: Balken unter Belastung

1.2.6 Werkstoffhärte und Härteprüfung

Als Härte eines Werkstoffs wird im Allgemeinen der Widerstand gegen das Eindringen eines Fremdkörpers beim Ritzen, Furchen, Schneiden, Schlagen, Aufprallen oder Pressen in dem oberflächennahen Werkstoffbereich bezeichnet.

Zur messtechnisch Bestimmung wird als Härte der Widerstand gegen das Eindringen eines härteren Festkörpers unter Einwirkung einer ruhenden Kraft definiert. Somit läßt man bei allen Prüfverfahren hinreichend harte Eindringkörper, mit vorgesehener geometrischer Form, während einer festgelegten Zeit und mit einer bestimmten Kraft auf das Werkstück einwirken. Der Eindringkörper darf sich bei dieser Messung nur elastisch verformen. Als Härtemaß wird entweder die auf die Oberfläche des entstandenen Eindrucks bezogene Prüfkraft (Brinellhärte, Vickershärte), oder die vom Eindringkörper hinterlassene Eindringtiefe (Rockwellhärte) benutzt.

1.3 Versuch

1.3.1 Biegeversuch

Zur Messung wird der Probenstab auf die Lager aufgelegt. Die Kerbe im Stab muss auf dem Festlager leicht einrasten. Der Spiegel wird mit der reflektierenden Seite zum Schirm aufgestellt. Als Schirm fungiert in diesem Fall die anschlie-

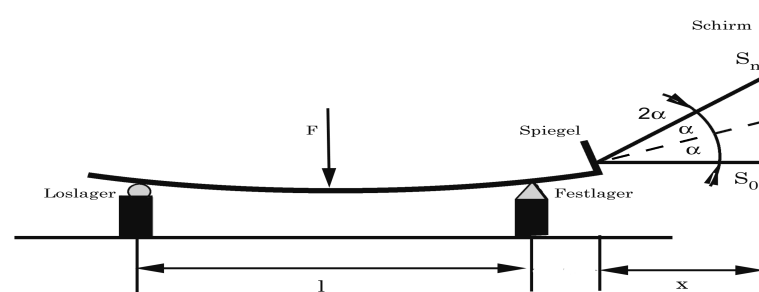


Abbildung 1.6: Biegeversuch

ßende Wand, an der ein DIN A4 Blatt Millimeterpapier, welches Sie mitgebracht haben, befestigt wird. Der Aufbau wird im Abstand x vom Schirm positioniert. Wählen Sie hier einen Abstand von ca. 50cm bis 70cm um eine möglichst grosse Ablenkung des Laserstrahls für die eingesetzten Gewichtsstücke zu erhalten. In der Nähe des Schirmes wird der Diodenlaser so aufgestellt, dass der Laserstrahl den Spiegelmittelpunkt ungefähr trifft und auf die Unterkante des Millimeterpapiers reflektiert wird. Prüfen Sie die Ablenkung des Laserstrahls, indem Sie den Stab in der Mitte mit dem grössten Gewichtsstück belasten. Der reflektierte Strahl muss das Papier noch treffen. Markieren Sie den Nullpunkt im unbelasteten Fall auf dem Millimeterpapier. Belasten Sie jetzt den Stab mit Gewichtsstücken von 50g bis 200g in Schritten von 15g und markieren die angezeigten Positionen auf dem Papier.

Notizen für das Messprotokoll

Fertigen Sie eine schematische Skizze des Aufbaus an und tragen die Parameter x und ℓ ein. Durch das Reflexionsgesetz gilt, dass der Winkel zur Spiegelnormale für einfallenden- und reflektiertem Strahl gleich ist. Sie bestimmen daher über $\tan \frac{S_n}{x}$ den doppelten Winkel. Beachten Sie dieses bei der Auswertung für das Elastizitätsmodul.

1.3.2 Zugprüfung

Durch den Zugversuch werden Festigkeits- und Verformungskenngrößen der Werkstoffe bei einachsiger, über den Querschnitt gleich verteilten Zugbeanspruchung nach DIN 50145 bestimmt. Das Aufbringen der Last erfolgt hierbei gleichmäßig und zügig bei einer genormten oberen Grenze der Belastungsgeschwindigkeit. Das verwendete Materialprüfgerät ist mit Kraft- und Wegsensoren ausgerüstet. Die dazugehörige Messelektronik ist mit einem XY-Schreiber verbunden. Die Prüfmaschine wird zunächst eingeschaltet. Die Zugprobe wird in die Spannbacken der Maschine eingespannt. Beim Einspannen der Probe muss die Kraftanzeige auf Null bleiben. Der Verstellhebel für die Belastungsgeschwindigkeit wird in Nullstellung gebracht, die Öldruckentlastungsschraube geschlossen. Der Kraft-, sowie der Wegsensor werden auf Null gestellt. Der Messbereich des Schreibers wird gewählt, der Schreiberkopf auf die Nullposition des Millimeterpapiers eingestellt und abgesenkt.

Die Belastungsgeschwindigkeit der Maschine wird jetzt auf einen kleinen Wert eingestellt. Wegen des starken Einflusses der Belastungsgeschwindigkeit auf die obere Streckgrenze R_eH wird vor Erreichen des Fließbereiches die Belastung langsamer aufgebracht. Im elastischen Bereich, in dem die Dehnungen bezogen auf die Belastungen gering sind, ist die Belastungsgeschwindigkeit – hingegen im plastischen Bereich die Dehngeschwindigkeit maßgebend. Der empfohlene Maximalwert ist $v_{\varepsilon(max)} = 3(\%/min)$

In den Anlagen finden Sie ein Beispiel für die Versuchsdurchführung und das zugehörige Messprotokoll. Die eingesetzten Proben müssen wie folgt vorbereitet werden:

- Markieren der Versuchslänge ca. 40 mm
- Markieren der Anfangsmeßlänge ca. 30 mm
- Markieren der Teilmeßlängen in 10 mm und 2 mm Unterteilungen.
- Ausmessen der Probenquerschnittsabmessungen ca. $3 \times 10 \text{ mm}^2$

1.3.3 Brinellhärteprüfung

Bei der Brinellhärteprüfung wird eine gehärtete Stahlkugel des Durchmessers D mit einer Kraft F senkrecht zur Oberfläche des Messobjektes in die zu vermessende Werkstoffoberfläche gedrückt. Die Belastung der Prüfkugel erfolgt hierbei stoßfrei und erreicht nach einer Lastaufbringzeit ($t_2 - t_1$) ihren Sollwert. Die Lasteinbringzeit ($t_3 - t_2$) soll bei Werkstoffen mit $T_s > 600^\circ\text{C}$ mindestens 10 s, bei Werkstoffen mit $T_s < 600^\circ\text{C}$ mindestens 30 s betragen, wobei T_s die Schmelztemperatur des Werkstoffs sein soll. Am Ende der Lasteinwirkzeit berechnet sich die Tiefe der entstandenen Kugelkalotte zu

$$x = \frac{1}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (1.17)$$

wobei d der Eindruckdurchmesser ist. Für die Oberfläche der Kugelkalotte ergibt sich

$$O_k = \pi D x = \frac{\pi D}{2}(D - \sqrt{D^2 - d^2}) \quad (1.18)$$

Als dimensionslose Maßzahl MZ der Brinellhärte HB hat man

$$MZ = \alpha \frac{F}{O_k} = \frac{\alpha 2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.19)$$

mit $\alpha = 0.102 \text{ mm}^2/\text{N}$ vereinbart. Die Brinellhärteangabe erfolgt in $MZHB$ also z.B. 280 HB oder 350 HB. Anmerkung: Wird z.Zt. nicht durchgeführt.

Durchführung mit dem Prüfgerät

In den unteren verschiebbaren Balken werden Stempel und Prüfeinrichtung eingesetzt. Die Werkstoffprobe wird auf den Stempel gelegt und die Prüfkugel zur Oberfläche des Werkstücks abgesenkt. Hierbei sollte die Kraftanzeige auf Null bleiben. Führen Sie den Versuch nach den o.g. Grundlagen durch.

1.4 Auswertung

- Bestimmen Sie das Elastizitätsmodul für den untersuchten Stab aus dem Biegeversuch. Geben Sie auch den Literaturwert für das Material an.
- Bestimmen Sie aus dem Zugversuch das Elastizitätsmodul, die Höchstzugkraft und die Kraft bei Bruch.
- Vergleichen Sie den Wert für das Elastizitätsmodul aus dem Biegeversuch mit dem Wert aus dem Zugversuch. Welche gravierenden Unterschiede fallen hierbei auf.