Auftrag WKZ: Mechanisches Verhalten von Werkstoffen

1. Lesen Sie den Text «Das mechanische Verhalten von Werkstoffen». Mit Lesen ist ein aktives Lesen gemeint. D.h. Sie fokussieren sich auf den Inhalt und lassen sich nicht durch externe Einflüsse ablenken. Tipp: lesen Sie den Text zuerst flüssig durch, so wie Sie vielleicht eine Zeitung lesen um einen Überblick des Inhaltes zu erhalten. Danach gehen Sie vertiefter in den Text und markieren wichtige Stellen.

2. Erstellen Sie ein Mind-Map des Inhaltes nach dem Motto «Bilder statt Texte». Anleitungen finden Sie im Internet genügend.

3. Vertiefen Sie die verschiedenen, im Text erwähnten Prüfverfahren mit Hilfe des Internets (z.B. youtube.com, wikipedia.com usw.). Geben Sie die «guten» Links in Ihrem Mind Map an.

4. Benutzen Sie das Dokument an der Lernkontrolle vom 3.12.26 und geben Sie es mit Ihren Lösungen ab.

Sie haben an folgenden Daten jewils 1 Lektion zur Verfügung:
12.11./19.11. und am 26.11.26. Bei Bedarf arbeiten Sie auch zu Hause an diesem Auftrag.
Lernkontrolle gemäss Planungstabelle am 3.12.26. Für diese Lernkontrolle dürfen Sie ausschliesslich Ihr Mind-Map benutzen.
Diese Arbeit wird benotet.

2 Das mechanische Verhalten von Werkstoffen

2.0 Überblick

Im praktischen Einsatz werden die Werkstoffe der Elektrotechnik mechanisch und thermisch belastet. Für technische Anwendungen unter Umwelteinflüssen ist darüber hinaus die Beständigkeit der eingesetzten Werkstoffe gegen Korrosion von großer Bedeutung. In erster Linie jedoch erfüllen sie diese Aufgaben unter Nutzung ihrer elektrischen und magnetischen Eigenschaften. Eine Übersicht über die mannigfachen Belastungen, denen Materialien in der Praxis ausgesetzt sind, gibt unten stehende Aufstellung. Zur Ermittlung der Materialtauglichkeit dienen Prüfmethoden, die in Normen niedergelegt und ständig auf dem neuesten Stand zu halten sind.

Belastungsarten:

mechanische Belastung

statisch	dynamisch
	pulsierend
gleich bleibend	wechselnd
oder	stoßend
stetig ansteigend	schlagend

zeitliche Belastung

kurzzeitig	langzeitig

thermische Belastung (zusätzlich)

extrem kalt normal extrem heiß

Umwelt-(chemische) Belastung

normale Atmosphäre	Feuchtigkeit	chemische H_2O Stoffe Säuren, Basen u. ä.

Im ersten Abschnitt des Kapitels erhält der Lernende einen Überblick über die Vorgänge im Werkstoff bei mechanischer Belastung, die daraus resultierenden Eigenschaftsänderungen und ihre Prüfverfahren. In diese Darstellung sind nicht nur die metallischen, sondern auch organische und anorganische Werkstoffe mit einbezogen.

Die Grundvoraussetzung, dass ein Werkstoff die Belastungen des praktischen Einsatzes unbeschadet übersteht, ist die exakte Kenntnis und Messung von Kenngrößen.

Die richtige Auswahl der Proben und die statistische Auswertung der Prüfungen obliegt der Qualitätsstelle oder Prüfabteilung. Sie muss garantieren, dass nicht nur ein Einzelteil, sondern jedes Teil einer Serie den gestellten Anforderungen genügt; verdeckte Mängel müssen aufgedeckt und ausgeschaltet werden.

Über die Prüfungen werden normgerechte Protokolle ausgestellt.

Prüfprotokolle

- Werksbescheinigungen (A)
  über die Einhaltung der Bestellvorschriften.
- Werkszeugnisse (B)
  über die Ergebnisse der Prüfung nach Bestellung.
- Abnahmezeugnisse einer amtlichen Prüfstelle (C)
  über die Einhaltung der Bestellvorschriften.

2.1 Ausgewählte Verfahren zur Bestimmung nichtelektrischer Werkstoffeigenschaften

Kompetenzen

Der Lernende kann …

- die Entstehung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms durch den Zugversuch für Metalle, Kunststoffe und Keramik erklären.
- aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm die für die Belastungs- und Verformungsfähigkeit eines Werkstoffes erforderlichen Größenwerte entnehmen.
- den Begriff Härte definieren.
- Härteprüfverfahren nach DIN EN ISO beschreiben.
- Bestimmung der Schlag- und Biegefestigkeit nach DIN EN beschreiben.
- die Prüfverfahren für Kunststoffe, wie Wärmedehnung, Wärmeformbeständigkeit und Wärmebeständigkeit in der Durchführung beschreiben und ihre Aussagen erläutern.

Die im Kapitel behandelten Werkstoffprüfverfahren beziehen sich nicht nur auf die Gruppe der metallischen Werkstoffe, sondern entsprechend der Bedeutung der Isolierstoffe für die Elektrotechnik, wie Kunststoffe und Keramik, auch darauf.

2.1.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist eine wichtige mechanische Prüfung für Werkstoffe; einfach und zuverlässig lassen sich mit ihm Werte für die Festigkeit und Formbarkeit ermitteln.

Zugversuch für metallische Werkstoffe

Im Zugversuch nach DIN EN 10002 werden genormte Probestäbe (vgl. Bild 2.1-1) in Prüfmaschinen in Richtung ihrer Stabachse (Normalspannung) bis zum Bruch beansprucht (siehe Bild 2.1-2). Die Belastung steigt dabei langsam und stetig an. Man erhält Festigkeits- und Verformungskennwerte. Die Kraft-Verlängerungskurven sind für Werkstoffe und ihre Behandlungszustände charakteristisch. Als Proben dienen meistens Rundstäbe mit verdickten Enden zum Einspannen in die Prüfmaschine, ihre Abmessungen sind genormt. Für kleinere Werkstücke oder Bleche benutzt man kleinere Stäbe oder Flachproben (DIN EN 10002).

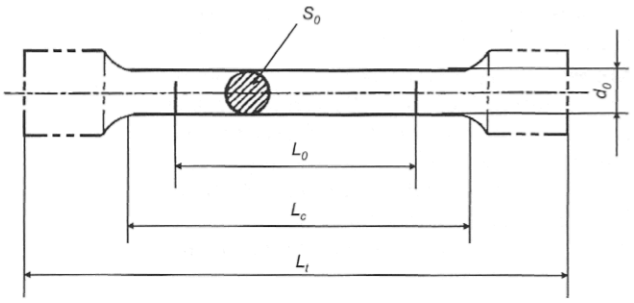


Bild 2.1-1 Zugstab nach DIN EN 10002

Allgemein bezeichnet man Ausgangswerte als Nullwerte und indiziert sie mit Null. Für Zugstäbe gelten die Bezeichnungen:

Messlänge	L in mm
Durchmesser	d in mm
Querschnitt	S in mm^2
Ausgangs-Messlänge	L_0
Ausgangs-Durchmesser	d_0
Ausgangs-Querschnitt	S_0

An Messvorrichtungen werden die jeweilige Kraft F und die zugehörige Längung ΔL des Stabes festgestellt. Die Wertepaare werden abgelesen oder automatisch registriert.

Bild 2.1-2 zeigt schematisch den Dehnungsvorgang vom elastischen über den plastischen Verformungsbereich bis zum Bruch der Probe. Verformbare Metalle, wie Baustähle, Kupfer- und Aluminium-Legierungen u. a. „schnüren sich ein" an einer Stelle, an der sie schließlich brechen.

Im Kraft-Verlängerungs-Diagramm nach Bild 2.1-2 folgt der Linienzug zunächst dem linearen HOOKEschen Gesetz bis zur Elastizitätsgrenze. Bei Belastungen unterhalb der Elastizitätsgrenze federt der Stab bei Entlastung wieder bis zur Ausgangslänge L_0 zurück; dieses Be- und Entlastungsspiel kann bis zum Eintritt von Ermüdungserscheinungen wiederholt werden.

Nach Überschreiten der Elastizitätsgrenze beginnt die plastische Deformation. Die Längenänderung ΔL wächst bei weiter ansteigender Kraft stärker und folgt nicht mehr dem HOOKEschen Gesetz. Mit fortschreitender plastischer Deformation kommt es zur zunehmenden Kaltverfestigung (siehe 2.2). Da das Stabvolumen konstant bleibt, wird bei Stabverlängerung der Querschnitt S_0 kleiner. Die Dichte des Stabes

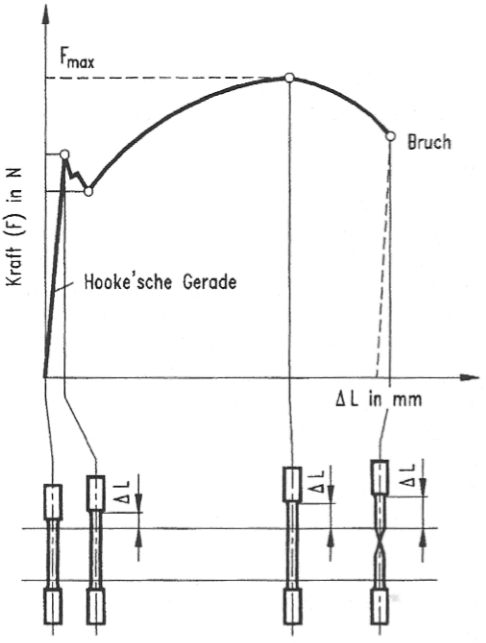


Bild 2.1-2 Kraft-Verlängerungs-Diagramm

Im elastischen Bereich gilt das HOOKEsche Gesetz:
$\Delta L \sim F$

bleibt bei Zug- und Druckbelastung konstant, ebenso bleibt der Gittertyp unverändert.

Mit Erreichen der Höchstkraft F_{max} beginnt die Einschnürung des Stabes; die Verlängerung erfolgt nur noch im Gebiet der Einschnürstelle. Dafür ist im Vergleich zur gleichmäßigen Querschnittsabnahme über die gesamte Stablänge bis zu F_{max} (Gleichmaßdehnung) eine immer geringer werdende Kraft notwendig, bis schließlich der Bruch eintritt.

Aus den ermittelten Messwerten der Kräfte und Längen kann man die Spannungs- und Dehnungswerte errechnen, daraus ergibt sich das Spannungs-Dehnungs-Diagramm, Kurve a (siehe Bild 2.1-3).

Auf der Ordinate ist die Spannung σ in $N \cdot mm^{-2}$ aufgetragen. Sie ist der Quotient aus der jeweils wirkenden Kraft bezogen auf den Ausgangsquerschnitt S_0.

Auf der Abszisse wird die prozentuale Dehnung ε als Quotient aus der Längenänderung bezogen auf die Ausgangslänge aufgetragen. Die Kurve b im Bild 2.1-3 ist die so genannte wahre Spannungs-Dehnungs-Kurve. Die *wahre Spannung* ist der Quotient aus der wirkenden Kraft und dem zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Stabquerschnitt. Mit Beginn der Einschnürung ist das der Querschnitt der Einschnürstelle.

Der Konstrukteur legt seinen Berechnungen immer den Ausgangsquerschnitt S_0 der Konstruktionen zugrunde.

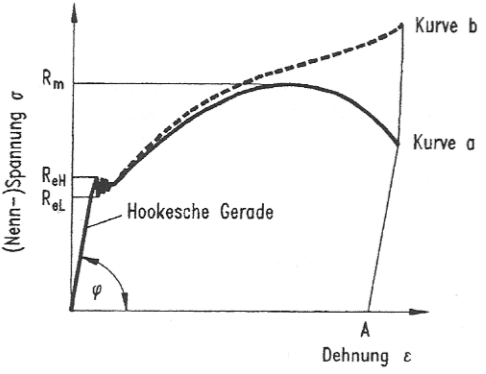


Bild 2.1-3 Spannungs-Dehnungs-Diagramm

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

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100\,\% = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\,\%$$

Kenngrößen aus dem Zugversuch

Festigkeitskenngrößen

- **Streckgrenze**

Bei gut verformbaren Stählen (Baustähle) tritt nach Überschreiten des Spannungs-Gebietes der elastischen Verformung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm eine markante Unstetigkeitsstelle, die **Streckgrenze** (R_e), auf. Man unterscheidet die obere Streckgrenze (R_{eH}) von der unteren Streckgrenze (R_{eL}), wie in Bild 2.1-3 dargestellt.

- **0,2-%-Dehngrenze**

Die im Probestab beim Übergang vom elastischen in das plastische Gebiet vorhandene Spannung, nämlich die Elastizitätsgrenze E in $N \cdot mm^{-2}$, lässt sich beim Zugversuch nicht

direkt ermitteln; dieser Grenzwert ist aber konstruktiv wichtig, gibt er doch die Belastungsgrenze an, bei deren Überschreiten der jeweilige Werkstoff plastisch verformt wird, das bedeutet seine Gestalt bleibend verändert. Falls die Ermittlung einer Streckgrenze experimentell nicht möglich ist, bestimmt man die Spannung im Stab, bei der er sich um 0,1 oder 0,2 % gedehnt hat, siehe Bild 2.1-4. Die zugehörige Spannung bezeichnet man als **0,2-%-Dehngrenze** ($R_{p0,2}$). Die Höchstbelastungen einer Konstruktion müssen deutlich unter der $R_{p0,2}$-Grenze bzw. der Streckgrenze liegen.

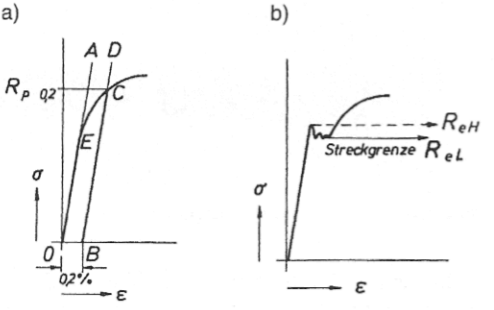


Bild 2.1-4
a) Ermittlung der $R_{p0,2}$-Dehngrenze
b) σ-ε-Diagramm mit Streckgrenze

- **Zugfestigkeit**

Die maximale Belastbarkeit wird durch die Festigkeitskenngröße **Zugfestigkeit** (R_m) erfasst. Die Größe R_m als experimentell ermittelter Wert stellt eine wichtige Berechnungsgrundlage für den Konstrukteur dar.

- **Elastizitätsmodul**

Im Bereich der HOOKEschen Geraden gilt: Die Spannung ist proportional der Dehnung. Der Proportionalitätsfaktor ist der **Elastizitätsmodul** (E). Der E-Modul lässt sich auch grafisch interpretieren (siehe Bild 2.1-5) als Tangens des Anstiegswinkels α der HOOKEschen Geraden.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan\alpha$$

Je größer der E-Modul eines Werkstoffes ist, um so höher ist sein Widerstand gegen eine elastische Verformung.

Verformbarkeitskenngrößen

- **Bruchdehnung**

Nach dem Bruch ist an den Stabbruchstücken die Längenzunahme infolge der plastischen Verformung messbar. Bruchdehnung A ist die auf die Anfangslänge L_0 bezogene bleibende Längenänderung ΔL_h nach dem Bruch der Probe in %. Sie wird mit 5 oder 10 indiziert, je nach der Probenlänge $L_0 = 5d_0$ oder $10d_0$.

- **Brucheinschnürung**

Brucheinschnürung Z ist die auf den Anfangsquerschnitt S_0 bezogene bleibende Querschnittsverminderung ΔS_b nach dem Bruch der Probe in %, siehe Bild 2.1-6. Sie charakterisiert neben der Bruchdehnung das Verformungsver-

Beachte: Allgemein spricht man von der Spannung mit dem Symbol σ, die spezifische Spannungs-Kenngröße (gemessener Wert) erhält das Symbol R (Resistance franz.: Widerstand)

R_p: Spannung, bei einem bestimmten Betrag bleibender Dehnung

R_e: Spannung, bei der trotz zunehmender Verlängerung die Kraft (F) gleich bleibt oder fällt.

R_m: Spannung bei F_{max}

HOOKEsches Gesetz:

$$\varepsilon \sim \sigma \qquad (3\text{-}1)$$

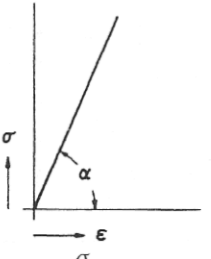
in % in $N \cdot mm^{-2}$

$$\varepsilon E = \sigma \qquad (3\text{-}2)$$

in $N \cdot mm^{-2}$ in $N \cdot mm^{-2}$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \qquad (3\text{-}3)$$

E-Modul in $N \cdot mm^{-2}$



$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan\alpha$$

Bild 2.1-5 Grafische Bestimmung des E-Moduls aus dem σ-ε-Diagramm

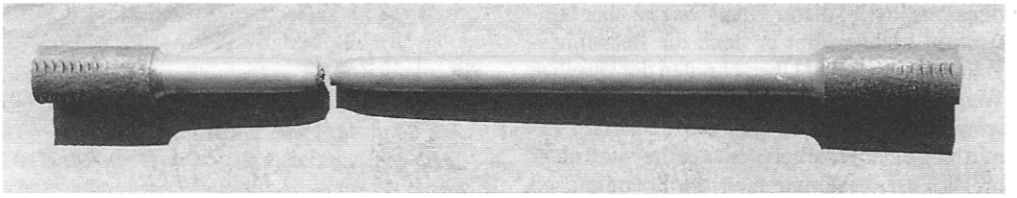


Bild 2.1-6 Eingeschnürte Zugprobe

halten eines Metalls. Spröde Metalle wie Zink, gehärtete Stähle und Gusswerkstoffe zeigen keine oder nur geringe Brucheinschnürung.

$$A = \frac{\Delta L_b}{L_0} \cdot 100\,\%$$

$$Z = \frac{\Delta S}{S_0} \cdot 100\,\%$$

Zusammenfassung

Die σ-ε-Diagramme geben einen Überblick über das Festigkeits- und Verformbarkeitsverhalten eines Werkstoffes und gestatten die experimentelle Bestimmung von Kennwerten.

Für in der E-Technik häufig benutzte Werkstoffe sind in Bild 2.1-7 die typischen σ-ε-Diagramme gezeichnet. In Tabelle 2.1-1 sind mechanische Werkstoffkenngrößen zusammengefasst mit Symbol und Einheiten, die mit dem Zugversuch ermittelt werden können, aufgeführt. Die alten Formelzeichen für Kenngrößen aus dem Zugversuch, die 1975 der internationalen Norm ISO angepasst wurden, enthält Tabelle 2.1-2.

Tabelle 2.1-1 Anhaltszahlen für mechanische Werkstoffgrößen

Werkstoff	$R_{p0,2}$ [N/mm²]	R_m [N/mm²]	A_{10} [%]
E-Al weich	60	100	> 20
E-Al hart	130	180	< 1
E-Cu weich	50	200	> 60
E-Cu hart	400	500	< 6
CuZn 37 weich	100	300	< 60
CuZn 37 hart	500	600	< 8
Stahl weich	200	300	> 25
Stahl hart	800	1000	< 6

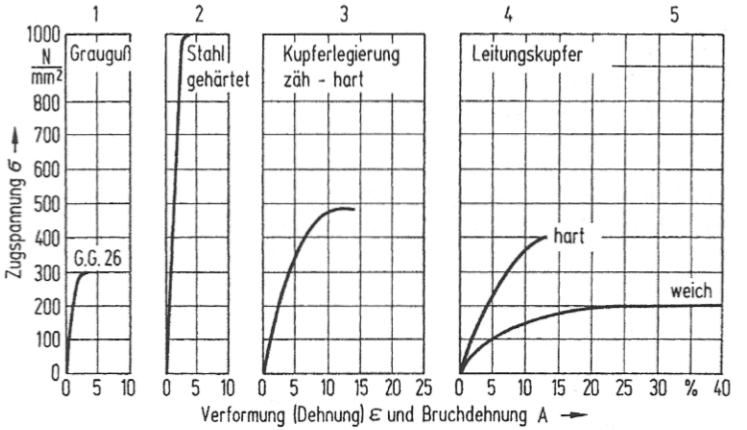


Bild 2.1-7 Spannungs-Dehnungs-Diagramme ausgewählter Werkstoffe der E-Technik

Zugversuch für Kunststoffe

Der Zugversuch für Kunststoffe nach DIN EN 20527 erfolgt in großer Anlehnung an die Prüfung metallischer Werkstoffe. Unterschiede ergeben sich infolge der besonderen Eigenschaften der Kunststoffe (siehe Kapitel 2.3) in:

- der Durchführung der Prüfung,
- der Beurteilung der Prüfergebnisse und
- in der Definition der Kenngrößen.

Probekörper sind Schulter- oder Flachproben nach ISO 2557-2, die durch Pressen, Spritzgießen oder Spanen hergestellt werden, entsprechend der Zeichnungen aus Bild 2.1-8. Prüfgeschwindigkeit und Prüftemperatur sind genauer als bei der Prüfung der Metalle einzuhalten. Es gelten die Festlegungen der DIN EN 20527 hinsichtlich der Prüfgeschwindigkeit zwischen 1 bis 500 mm/min in festgelegten Schritten und der Prüftemperatur von 23 °C ± 2° sowie einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % ± 5 %. Die Prüfmaschinen sind ausgelegt für:

- niedrige Kraftbereiche,
- variable Prüfgeschwindigkeit und
- erheblich größere Verformungswege gegenüber den Metallen.

Da die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffteilen erheblich von der Gestaltung und den Herstellungs- bzw. Verarbeitungsbedingungen abhängen, sind die Kenngrößen als Berechnungsunterlagen für die Dimensionierung von Kunststoffbauteilen nicht ausreichend und nur für erste grobe Abschätzungen geeignet. In Tabelle 2.1-3 sind die Kenngrößen für Kunststoffe zusammengefasst. Außer den in der Tabelle aufgeführten neuen Bezeichnungen für die Kennwerte sind auch noch die bisher gebräuchlichen erlaubt, σ_s und ε_s (Streckspannung und -dehnung), σ_B und ε_B (Zugspannung und -dehnung) und σ_R und ε_R (Reißspannung und -dehnung).

Tabelle 2.1-2 Durch den Zugversuch zu ermittelnde mechanische Kenngrößen für Metalle

Kenngröße	Symbol neu	Symbol alt	Einheit
Zugfestigkeit	R_m	σ_B	N · mm²
Streckgrenze	R_e	σ_S	N · mm²
0,2-Dehngrenze	$R_{p0,2}$	$\sigma_{0,2}$	N · mm²
Bruchdehnung	A	δ	%
Brucheinschnürung	Z	ψ	%
Elastizitätsmodul	E	E	N · mm²

Tabelle 2.1-3 Durch den Zugversuch zu ermittelnde mechanische Kenngrößen für Kunststoffe

Kenngröße	Symbol 1)	Symbol 2)	Einheit
Zugfestigkeit	σ_{zM}	σ_M	N/mm²
Streckspannung	σ_{zS}	σ_y	N/mm²
Reißdehnung	ε_{zR}	ε_R	N/mm²
Dehnung bei max. Spannung	ε_{zM}	$\varepsilon(\sigma_M)$	%
Reißfestigkeit	σ_{zR}	σ_R	N/mm²
Zugspannung bei x-%-Dehnung	σ_{zx}	σ_x	N · mm²
x-%-Dehnung	ε_{zx}	ε_x	N · mm²

1) nach DIN EN 20527
2) nach ISO 527

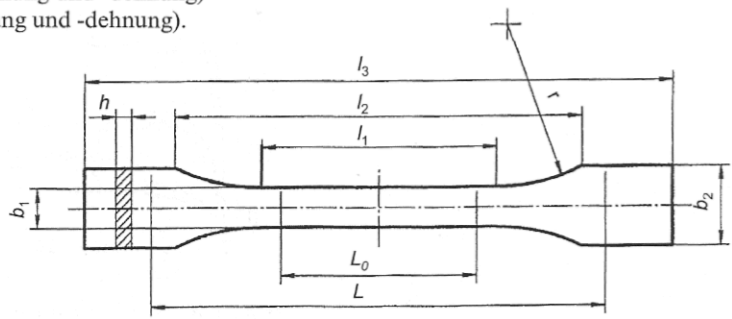


Bild 2.1-8 Probekörper für Kunststoffe nach DIN EN ISO 2557-2

Beachte: Bei der Kunststoffprüfung werden die Dehnungen als Gesamtdehnungen unter Last gemessen, nicht wie bei Metallen nach der Entlastung als bleibende Dehnungen, siehe auch Bild 2.1-9. Für in der E-Technik häufig eingesetzte Kunststoffe sind im Bild 2.1-10 die Spannungs-Dehnungs-Diagramme gezeichnet.

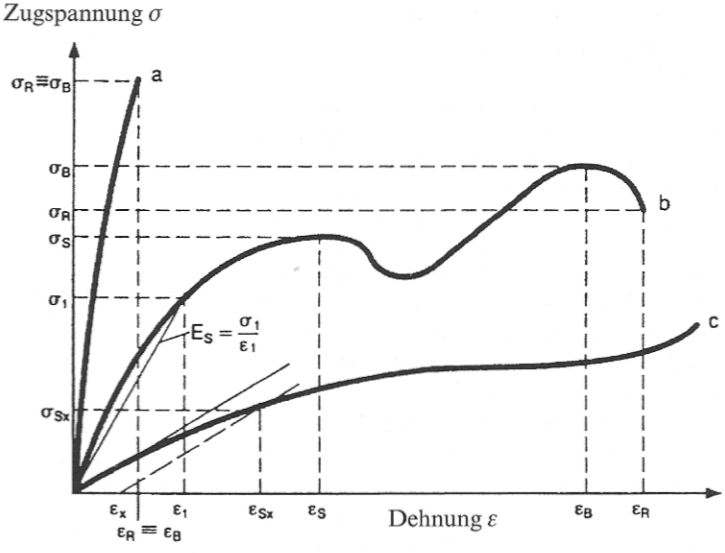


Bild 2.1-9 Charakteristische Spannungs-Dehnungs-Kurven für Kunststoffe
a: Duromeres, Plastomeres glasartig;
b: Plastomeres verstreckbar;
c: Elastomeres

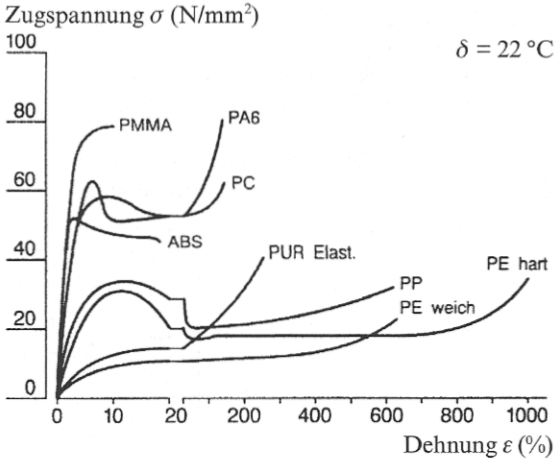


Bild 2.1-10 Spannungs-Dehnungs-Diagramme ausgewählter Kunststoffe

2.1.2 Härteprüfung

Härte ist der Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines Körpers entgegensetzt. Dabei setzt man voraus, dass der Prüfkörper härter und von bestimmter Geometrie ist. Wesentlich ist, dass der Prüfkörper im Werkstoff messbare Eindrücke erzeugt.

Die älteste Methode der Härtebestimmung ist die **Ritzhärte**. Sie führt zur MOHSschen Härteskala. Als Härtevergleich dienen Mineralien unterschiedlicher Härte: Diamant hat als härtestes Mineral die Zahl 10, Korund 9 usw. bis zum weichen Talkum mit 1.

Beim Einpressen eines härteren Prüfwerkzeuges in einen weicheren Stoff gibt dieser zunächst elastisch nach; erst bei größerem Flächendruck verformt er sich plastisch. Im Werkstück verlaufen dabei analoge Vorgänge wie beim Zugversuch; aber das Verformungsgebiet ist eng begrenzt und die Verformungsgeschwindigkeit sehr hoch.

Für die Härtebestimmung von Werkstoffen bieten sich folgende Prüfarten an:

Härte = Widerstand eines Werkstoffes gegen das Eindringen eines Körpers

Dynamische Härteprüfung

Rücksprung-Härteprüfverfahren DIN 53 505

Man lässt einen Prüfkörper aus bestimmter Höhe auf die Probe fallen und schließt aus der Rückprallhöhe auf die Härte (Skleroskop zur Shore-Härte-Bestimmung und Duroskop [Rückprallwinkel], siehe Bild 2.1-11). Diese Methode wird bei gummielastischen Stoffen angewandt (Shore-Härte).

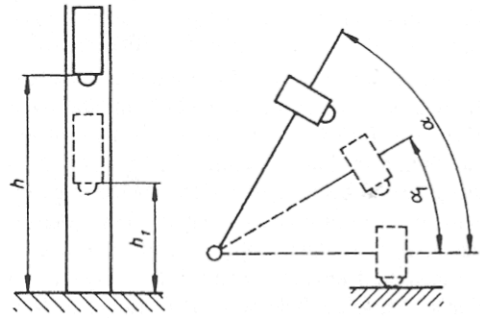


Bild 2.1-11 Rücksprung-Härteprüfverfahren

Statische Eindringverfahren

Für die Härtebestimmung von Metallen und einigen Kunststoffarten gibt es drei DIN-Prüfverfahren. Bei ihnen wird der härtere Prüfkörper stoßfrei in den Prüfling gepresst und der bleibende Eindruck vermessen. Man erhält gut vergleichbare Härtezahlen.

Die drei Eindringverfahren, VICKERS-Härte (HV), BRINELL-Härte (HB) und ROCKWELL-Härte (HR) werden in den folgenden Abschnitten ausführlicher erläutert.

2.1.2.1 Härteprüfverfahren für Metalle

VICKERS-Härte HV, DIN EN ISO 6507

Bild 2.1-12 zeigt das Messprinzip. Eine regelmäßige vierseitige Diamantpyramide mit dem Öffnungswinkel von 136° wird stoßfrei mit einer bestimmten Kraft (49 bis 980 N) so lange in die Probe gepresst, bis sie nicht mehr tiefer eindringt.

Diese Winkelgröße wurde deshalb gewählt, weil dadurch eine Vergleichbarkeit der VICKERS-Härtewerte mit den BRINELL-Härtewerten bis zu einer Härte von etwa 470 HV besteht. Die Einpresskraft muss einen auswertbaren Eindruck hinterlassen. Sie richtet sich nach der Härte des Prüflings. Die Belastungsdauer beträgt im Regelfall 10 bis 15 s. Voraussetzung für die Messung sind Proben mit fein geschlichteter Oberfläche. Gemessen werden zur Bestimmung der VICKERS-Härte die beiden Diagonalen (d_1, d_2) des quadratischen Eindruckes in der Oberfläche des Prüfstücks. Man misst mit einem Messmikroskop die Längen der Diagonalen aus.

Die VICKERS-Härte ist das dimensionslose Verhältnis der Prüfkraft F zur Eindruckoberfläche A.

Die Oberfläche des Eindrucks ergibt sich aus dem Durchschnittswert der gemessenen Diagonalen d und dem Winkel zur Grundfläche.

Trotzdem die VICKERS-Härte nahezu lastunabhängig ist, müssen aus der Härteangabe nach DIN EN ISO 6507 die Messbedingungen ersichtlich sein. Das Ergebnis der Standardmessung mit 30 kp und 10 bis 15 s Belastungszeit wird nur durch das Kurzzeichen HV gekennzeichnet. Für davon abweichende Prüfbedingungen sind entsprechende Zahlenangaben in der Reihenfolge: Belastung, Belastungszeit hinter dem Kurzzeichen HV notwendig.

Beispiel: F = 10 kp (98 N), Belastungszeit 40 s gemessener Härtewert 700;

700 HV 10/40.

Das VICKERS-Härteprüfverfahren ermöglicht die Bestimmung von Härtewerten im Bereich von weichen (z. B. Kupfer) bis sehr harten Werkstoffen (z. B. Siliziumkarbid). Außerdem eignet es sich zur Messung an Schichten, dabei ist eine Mindestschichtdicke einzuhalten. Die VICKERS-Härtewerte sind bis zu ca. 470 HV mit Messwerten der BRINELL-Härte vergleichbar.

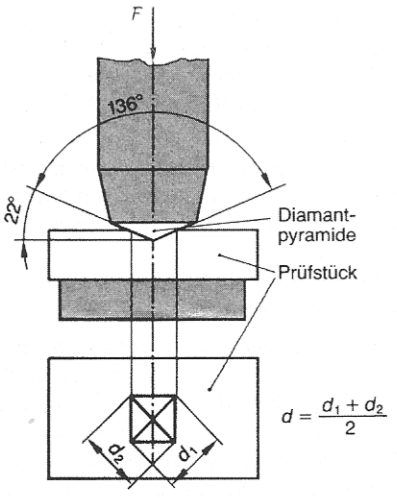


Bild 2.1-12 Messprinzip der Härteprüfung nach VICKERS

$$HV = \frac{F}{A}$$

$$A = \frac{d^2}{2 \cos 22°} = \frac{d^2}{1{,}854}\ (\text{mm}^2)$$

$$HV = \frac{1{,}845 \cdot 0{,}102\, F}{d^2}$$

Der Faktor 0,102 dient zur Umrechnung der Härtezahlen in die früheren Härtewerte mit den veralteten Krafteinheiten kp bzw. kg; so konnten die alteingeführten Härtewerte beibehalten werden.

1 N = 0,102 kp = 0,102 kg.

Es gilt:

$HB = 0{,}95\ HV.$

Außerdem ist nach DIN 50150 für Stähle eine Abschätzung der Zugfestigkeit aus der VICKERS-Härte möglich. Es gilt:

$R_m = 3{,}38\ HV$

im Bereich 80–650 HV. Für NE-Metalle gilt diese Umrechnung nicht!

BRINELL-(Kugeldruck-)Härte HB, DIN EN ISO 6506

Bei weichen Metallen kann das Kugeleindruckverfahren nach BRINELL angewandt werden. Hierbei wird eine Kugel von 2, 5 oder 10 mm Durchmesser mit einer bestimmten Kraft stoßfrei in das Prüfstück eingepresst (Bild 2.1-13). Die Belastungszeit beträgt wiederum 10 bis 15 s. Bei weichen Metallen, deren Rekristallisationstemperatur (2.2.1) unterhalb der Raumtemperatur liegt, z. B. bei Blei und Zink, sind 30 s vorgeschrieben.

Die Prüfkraft richtet sich nach der Härte des Werkstoffes, muss aber ein Vielfaches des Quadrates vom Kugeldurchmesser betragen. Für die verschiedenen Werkstoffgruppen sind deshalb Belastungsgrade (siehe Tabelle 2.1-4) festgelegt worden. Die Prüfkraft darf nur einen bleibenden Eindruck mit dem Durchmesser d von 0,24 bis 0,6 · D hervorrufen. Prüfkraft und Kugeldurchmesser D sind so auszuwählen, dass die genannte Bedingung erfüllt wird.

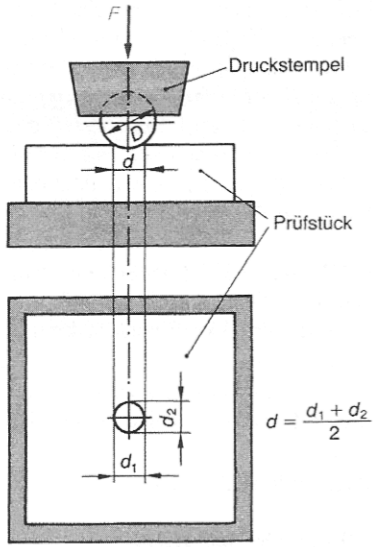


Bild 2.1-13 Messprinzip der Härteprüfung nach BRINELL

Tabelle 2.1-4 Zuordnung der Werkstoffgruppen zu den Belastungsgraden (BRINELL-Härteprüfung)

Prüfkraft	30 D^2	10 D^2	5 D^2	2,5 D^2	1,25 D^2
Erfassbarer Bereich	67 ... 450	22 ... 315	11 ... 159	6 ... 78	3 ... 39
Anzuwenden bei:	Stahl Stahlguss Temperguss	Gusseisen Nickel	Kupfer Zink Gussmessing	Leichtmetalle und ihre Legierungen	Blei Zinn Weichlote

D in mm	Prüfkraft F für die Belastungsgrade:				
	30 D^2	10 D^2	5 D^2	2,5 D^2	1,25 D^2
10	29420 N 3000 kp	9807 N 1000 kp	4903 N 500 kp	2452 N 250 kp	980,7 N 125 kp
5	7355 750	24523 250	1226 125	612,9 62,5	245,2 31,25
2,5	1839 187,5	612,9 62,5	306,5 31,25	153,2 15,62	61,29 7,82

Nach dem Entlasten wird mit einem Messmikroskop der Durchmesser d der hinterlassenen Kalottenfläche ausgemessen. Nach nebenstehenden Gleichungen lässt sich die Härtezahl HB aus der Prüfkraft F (N), dem Durchmesser der Kugel D (mm) und dem Durchmesser der Eindruck-Kalotte d (mm) errechnen. Die BRINELL-Härte ist wie die VICKERS-Härte das dimensionslose Verhältnis der Prüfkraft F zur Eindruckfläche A. In der Praxis entnimmt man den Härtewert, wenn F, D und d bekannt sind, aus Tabellen. Die HB-Zahlenwerte liegen zwischen 5 und 400. Das Ergebnis der Standardmessung mit $D = 10$ mm, $F = 3000$ kp und 10 – 15 s Belastungszeit wird nur durch das Kurzzeichen HB gekennzeichnet. Für davon abweichende Prüfbedingungen sind in Analogie zur HV-Bestimmung die geänderten Parameter anzugeben.

$$A = \frac{\pi}{2} \cdot D\,(D - \sqrt{D^2 - d^2}\ (\text{mm}^2)$$

$$HB = \frac{2F \cdot 1{,}02}{\pi \cdot D\left(D - \sqrt{D^2 - d^2}\right)}$$

Beispiel: 150 HB 10/250/30 bedeutet: Härtezahl 150, ermittelt mit einer Kugel von 10 mm Durchmesser, einer Druckkraft von 250 kp und 30 s Belastungszeit.

Die Zugfestigkeit von Stählen korrespondiert mit der BRINELL-Härte über folgende empirische Beziehung:

$R_m \sim 3{,}5$ HB (das gilt bis 350 HB).

ROCKWELL-Härte HRC und HRB, DIN EN ISO 6508

Bei der ROCKWELL-Härteprüfung HR verwendet man einen Diamantkegel (C) oder eine gehärtete Stahlkugel (B) als Prüfkörper. Die Messung erfolgt durch Eindrücken des Prüfkörpers mit der Prüfkraft $F = 1471$ N, die in zwei Stufen (Vorkraft $F = 98$ N, Hauptkraft $F = 1373$ N) aufgebracht wird. Die Belastungszeit für die Hauptkraft beträgt 10 s. Als Maß für die Härte wird die Tiefendifferenz zwischen der Eindringtiefe nach dem Aufbringen der Vorkraft und der bleibenden Eindringtiefe unter Vorkraft nach Wegnahme der Hauptkraft angegeben, siehe Bild 2.1-14.

Da mit steigender Härte die Eindringtiefe abnimmt, ist die Einteilung der ROCKWELL-C-Härteskala so festgelegt, dass die Messwerte von 100 Einheiten (eine HRC-Einheit entspricht 2 µm) abgezogen werden. So wird eine größere Härte auch durch eine größere Zahl ausgedrückt. Die ermittelten Härtezahlen HRC kön-

Tabelle 2.1-5 Parameter der Härteprüfverfahren

Verfahren	Prüfkörper [N]	Gewichtskraft
VICKERS HV	Pyramide mit quadr. Pyramide	49–980
ROCKWELL HR		
C	Diamantkegel	98 + 1373
B	Stahlkugel	98 + 1373
BRINELL HB	Stahlkugel D = 2,5; 5; 10 mm	61,3 bis 2942

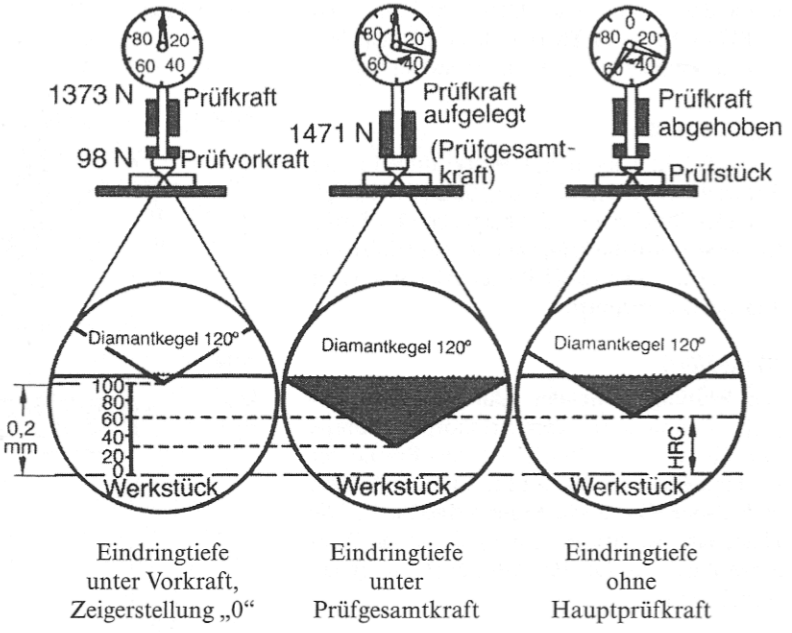


Bild 2.1-14 Messprinzip der ROCKWELL-Härteprüfung

nen direkt an der Messuhr abgelesen werden. Die Werte sind auf ganze Zahlen zu runden. Eine Zusammenfassung der Parameter einzelner Prüfverfahren enthält Tabelle 2.1-5.

2.1.2.2 Härteprüfverfahren für Kunststoffe

Bei den Härteprüfverfahren für Kunststoffe handelt es sich auch um Eindringhärteprüfungen. Die Eindringtiefen werden dabei wegen der hohen elastischen Rückfederung und ihrem visko-elastischen Verhalten, im Gegensatz zu den Metallen, unter Last nach festgelegten Zeiten bestimmt. Ein Vergleich der Härtezahlen von Kunststoffen mit denen anderer Werkstoffe ist nicht möglich. Eine Beziehung zwischen Härtewert und Zugfestigkeit, wie teilweise bei Metallen, lässt sich für Kunststoffe nicht herstellen.

Häufig benutzte Prüfverfahren sind:

- die Kugeldruckhärte nach DIN EN ISO 2039-1 (für Thermoplaste und Duroplaste) und

- die Shore-Härte nach DIN 53505 und DIN EN ISO 868 (für Thermoplaste mit niedriger Glastemperatur T_g und Elastomere).

Kugeldruckhärte

Diese Prüfung kann mit Prüfkräften in vier Stufen zu 49 N; 132 N; 358 N und 961 N erfolgen. Der Durchmesser der Kugel beträgt 5 mm. Gemessen wird die Eindringtiefe mit Hilfe einer Messuhr in mm und die Härtezahlen sind einer Tabelle zu entnehmen.

Shore-Härte

Zur Prüfung verwendet man ein Härteprüfgerät, wahlweise mit dem Prüfkörper Shore A bzw. Shore D, siehe Bild 2.1-15. Der Prüfkörper wird mit einer Kraft von 12,5 N (Shore A) bzw. 50 N (Shore D) auf die Probe aufgedrückt. Die Härtewerte werden ganzzahlig direkt am Prüfgerät abgelesen. Die Prüfzeit von 3 s ist genau einzuhalten.

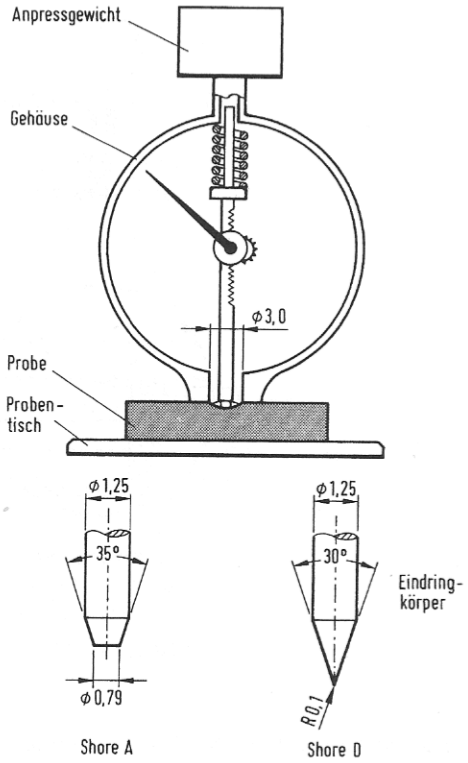


Bild 2.1-15 Prüfkörper zur Shore-Härte-Bestimmung

2.1.3 Schlagfestigkeit

Bei ihrem Einsatz unterliegen die Werkstoffe sehr häufig schlag- oder stoßartigen Beanspruchungen, es erfolgen dynamische Belastungen. Die unter statischer Belastung ermittelten Werte aus dem Zugversuch oder den Härtemessungen liefern keine Aussage über die dynamische Belastbarkeit einer Probe. Ein Versuch zur Bestimmung der dynamischen Belastbarkeit ist der Kerbschlagbiegeversuch. Die Schlagzähigkeit von Werkstoffen unterliegt stark der Beeinflussung durch die Temperatur. Für den Anwender liefern deshalb dynamische Prüfgrößen in Abhängigkeit von der Temperatur wichtige Hinweise für den Einsatz von Werkstoffen bei wechselnder Belastung. Für die metallischen Werkstoffe ist der Kerbschlagbiegeversuch in DIN EN 10045-1 und für Kunststoffe in DIN EN ISO 179-1 beschrieben.

Dieser Versuch wird mit einem Pendelschlagwerk (Bild 2.1-16) durchgeführt, bei dem ein Pendelhammer von einer vorgegebenen Höhe h_0 herunterfällt. In seinem tiefsten Punkt trifft das Pendel auf die eingelegte Probe. Beim Durchschlagen oder Durchziehen der Probe durch das Widerlager wird ein Teil der Pendelenergie für die Schlagarbeit A (bei Metallen A_V, bei Kunststoffen A_K) verbraucht. Sie lässt sich unmittelbar am Gerät ablesen. Der Quotient aus der Kerbschlagarbeit und dem Nennquerschnitt im Kerbgrund ist die **Kerbschlagzähigkeit** a_K.

Die Kerbschlagzähigkeit ist stark von der Probenform abhängig, so dass Werte, die an Proben unterschiedlicher Geometrie, siehe Bild 2.1-17, ermittelt wurden, nicht miteinander vergleichbar sind. Sie kann nicht als Größe für Festigkeitsberechnungen verwendet werden, weil in Bauteilen Spannungszustand, Belastungsablauf, Abmessungen und Kerbgeometrie anders als im genormten Versuch sind.

Gut geeignet aber ist sie für die Kontrolle und Beurteilung gleichmäßiger Verarbeitungsbedingungen, wie z. B. Ergebnisse der Wärmebehandlung von Metallen oder den technologischen Parametern bei Kunststoffen.

Die beschriebenen Prüfverfahren geben über die bei Langzeitwirkung (Monate, Jahre) auftretenden Veränderungen im Werkstoff keinen Aufschluss. Deshalb sind Dauerprüfverfahren, wie Standversuche (DIN 53444) und Dauerschwingversuch (DIN 50100) u. a. in Normen festgelegt. Bei Dauerbelastungen nahe der Elastizitätsgrenze beginnt sich das Material ganz allmählich plastisch zu verformen, es beginnt zu kriechen.

Pulsierende Zug-Druck- oder Biegewechselspannungen lösen Materialermüdungen aus. Sie führen ebenfalls zur Zerstörung des Werkstoffes.

Sollen Werkstofffehler ermittelt werden, kommen zerstörungsfreie Prüfverfahren in Betracht. Mit ihnen lassen sich Fehler im Inneren des Erzeugnisses oder Haarrisse auf der Oberfläche nachweisen. Die Prüfmethoden bedienen sich physikalischer Effekte, die gerade für den Elektrotechniker interessant sind, siehe Tabelle 2.1-6. Die Entwicklung dieser Prüfverfahren und der erforderlichen Geräte ist ohne die Elektroindustrie nicht denkbar.

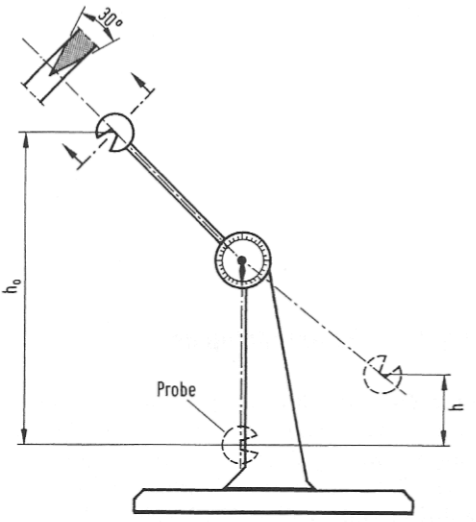


Bild 2.1-16 Pendelschlagwerk zur Bestimmung der Kerbschlagbiegefestigkeit

$$a_K = \frac{A}{S_0}$$

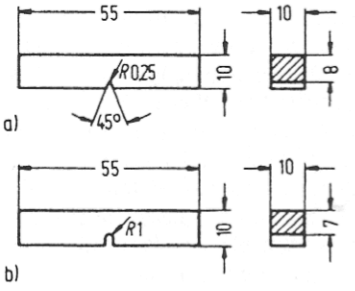


Bild 2.1-17 Kerbschlagproben für Metalle
a) ISO-V-Probe
b) DVM-Probe (**D**eutscher **V**erband für **M**aterialprüfung)

Mit Kriechen bezeichnet man eine langsame plastische Verformung unter langzeitiger Belastung; sie kann zum Stillstand kommen (Verfestigung) oder zum Bruch führen.

Tabelle 2.1-6 Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Fehlerart	Verfahren
Oberflächenfehler (Haarrisse)	Magnetpulververfahren Färbemethode
Volumenfehler (Risse, Blasen, Hohlräume, Einschlüsse)	Durchstrahlen (Röntgen, Neutronen) Ultraschallrückstreuung, Induktion (elektrisch, magnetisch)

2.1.4 Wärmedehnung

Eine Zunahme des Volumens, die ein Körper durch Erwärmung erfährt, erfolgt allseitig. Isotrope Körper dehnen sich gleichzeitig nach allen Richtungen in demselben Maße aus, während einkristalline Werkstoffe sich anisotrop verhalten, siehe Kapitel 1.2.2. Im Folgenden soll nur die lineare Wärmeausdehnung isotroper Stoffe betrachtet werden. Die Prüfung erfolgt mit Geräten zur thermischen Analyse, im speziellen Fall mit einem Dilatometer. Die Probentemperatur und die Längenänderung werden auf elektronischem Wege gemessen und ausgewertet.

Für Metalle liegt α bei ca. $2 \cdot 10^{-5}$/K, unter der Annahme, dass der lineare Ausdehnungskoeffizient von Metallen unabhängig von der Ausgangstemperatur ist. Die Werte für α sind bei keramischen Werkstoffen und Gläsern um eine Größenordnung kleiner. Bei Durchführungen und Verbindungen zwischen Metall und Glas (Glühlampen, Substrate, Gasentladungslampen u.a.) muss man gleiche Werte für α anstreben. Die Legierung von Eisen mit 34% Ni (Invar), die für elektrische Durchführungen in Gläsern verwendet wird, besitzt einen α-Wert von $0{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$.

Der α-Wert der Kunststoffe liegt im Bereich von $7 - 10 \cdot 10^{-5} \cdot K^{-1}$ und ist damit etwa achtmal höher als der von Stahl. Durch Füllstoffe kann α bei Kunststoffen herabgesetzt werden. Insbesondere kann der niedrige α-Wert von Glasfasern bewirken, dass glasfaserverstärkte Kunststoffe je nach Glasanteil sich dem α-Wert von Stahl nähern, was bei Faserverbunden von Bedeutung ist. Werte für die linearen Ausdehnungskoeffizienten von Werkstoffen der Elektrotechnik enthält Tabelle 2.1-7.

Der lineare Ausdehnungskoeffizient α eines festen Körpers ist das Verhältnis der Verlängerung, die der Probekörper bei einer Temperaturerhöhung um 1 K erfährt.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l \cdot \Delta T}$$

Tabelle 2.1-7 Linearer Ausdehnungskoeffizient α in 10^{-5}/K

Metalle	Zn	3
	Al	2
	Cu	2
	Fe	1
NMA	Glas	0,1
	Quarzglas	0,01
	Porzellan	0,5
NMO	Polyethen	20
	Polystyren	7
	Polyamid	8
	Polyester	2

2.1.5 Wärmeformbeständigkeit

Da die mechanischen Eigenschaften der Kunststoffe viel stärker als die anderer Werkstoffgruppen von der Temperatur abhängen, wurden für sie spezielle Prüfverfahren entwickelt.

Prüfverfahren nach VICAT

Nach DIN EN ISO 306 wird eine Probe langsam in einer Flüssigkeit bzw. Luft erwärmt und dabei mit einer Nadel senkrecht belastet, siehe Bild 2.1-18. Ausgewertet wird die Temperatur, bei der die Nadel 1 mm in die Probe eingedrungen ist.

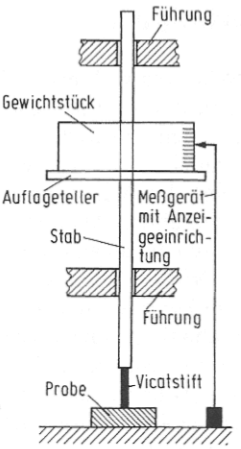


Bild 2.1-18 Schema des Prüfverfahrens nach VICAT

Prüfverfahren nach DIN EN ISO 75

Dieses Verfahren stimmt mit DIN 53461 inhaltlich überein. Die Probe wird langsam in einer Flüssigkeit erwärmt und nach Bild 2.1-19 auf Biegung belastet. Die Messgröße ist die Temperatur, bei der die Probe um ein bestimmtes Maß durchgebogen wird.

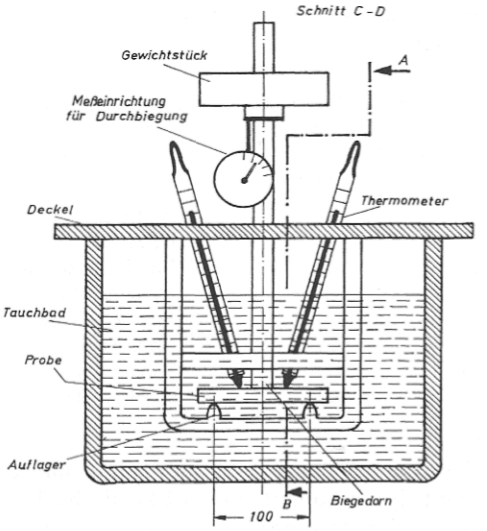


Bild 2.1-19 Prüfverfahren nach DIN EN ISO 75

Prüfverfahren nach MARTENS

Nach DIN EN ISO 75 werden Probestäbe nach Bild 2.1-20 eingespannt, belastet und in einem Wärmeschrank erwärmt. Die Messgröße ist die Temperatur, bei der sich die Stäbe um 6 mm durchgebogen haben.

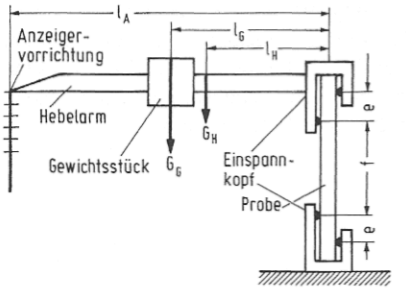


Bild 2.1-20 Prüfverfahren nach MARTENS

2.1.6 Wärmebeständigkeit

Bei lang andauernder Wärmeeinwirkung auf Kunststoffe tritt eine thermische Alterung auf, die sich auf die mechanischen Eigenschaften auswirkt. Um diese thermische Alterung vergleichbar zu machen, sind Prüfungen nach DIN EN ISO 2578 durchzuführen. Allerdings wird hier nur die Änderung der **mechanischen Eigenschaften** durch eine Wärmelagerung erfasst, nicht aber die Auswirkungen durch z. B. Strahlung, zusätzliche mechanische, chemische oder elektrische Beanspruchungen. Die Prüfungen erfolgen bei Raumtemperatur, und zwar vor und nach der entsprechenden Wärmelagerung. Um die Gefahr einer Wärmealterung auszuschließen, hat der VDE die Isolierstoffe in sieben Wärmeklassen mit Grenztemperaturen von 90 bis 180 °C eingeteilt. Einen Auszug gibt Tabelle 2.1-8.

Tabelle 2.1-8 Wärmebeständigkeitsklassen von Isolierstoffen nach VDE 0503 Text

Klasse	max. Temperatur in °C	Werkstoffbeispiele
Y	90	Papier und Verarbeitungsformen; Thermoplaste, wie PE, PVC, UF, POM u. a.
A	105	Imprägniertes Papier, Polyamidfolie
E	120	Papier mit Phenolharz, Tränklacke, Isolierlacke, PC, PUR, EVA
B	130	Mikanit (Glimmer/Alkydharz), PET
F	155	Kombinationen Glasfaser mit EP (FR4), PSU
H	180	Silikone, Silikone mit anorganischen Füllstoffen
C	>180	PTFE, Silikone, anorganische Isolierstoffe, PI

Sie erkennen, dass nur Polyimide (PI), Silikone und Polytetrafluorethen (PTFE) in die höchste Beständigkeitsgruppe C > 180 °C fallen. Viele organische Isolierstoffe gehören zur Klasse E > 105 °C < 120 °C.

Die Abhängigkeit der Lebensdauer eines Isolierstoffes von der Einsatztemperatur erkennen Sie am Bild 2.1-21 modellhaft, ohne das eine Aussage über die Lebensdauer eines realen Kunststoffes getroffen werden kann.

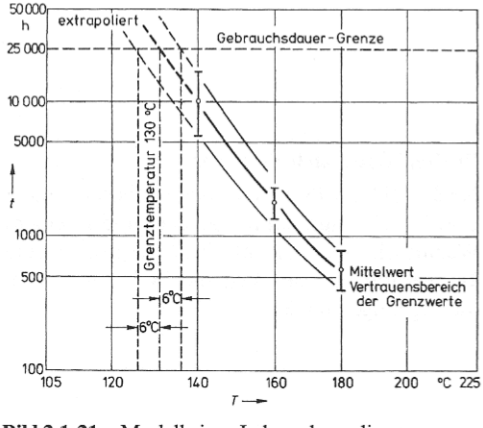


Bild 2.1-21 Modell eines Lebensdauerdiagramms für organische Isolierstoffe