

# Werkstofftechnik

Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung

Bearbeitet von  
Wolfgang W. Seidel

7., aktualisierte Auflage 2006. Buch. 424 S. Hardcover  
ISBN 978 3 446 40789 3  
Format (B x L): 16,1 x 22,9 cm  
Gewicht: 720 g

[Weitere Fachgebiete > Technik > Werkstoffkunde, Mechanische Technologie > Werkstoffkunde, Materialwissenschaft: Forschungsmethoden](#)

Zu [Inhaltsverzeichnis](#)

schnell und portofrei erhältlich bei

  
DIE FACHBUCHHANDLUNG

Die Online-Fachbuchhandlung [beck-shop.de](http://beck-shop.de) ist spezialisiert auf Fachbücher, insbesondere Recht, Steuern und Wirtschaft. Im Sortiment finden Sie alle Medien (Bücher, Zeitschriften, CDs, eBooks, etc.) aller Verlage. Ergänzt wird das Programm durch Services wie Neuerscheinungsdienst oder Zusammenstellungen von Büchern zu Sonderpreisen. Der Shop führt mehr als 8 Millionen Produkte.

HANSER

# Werkstofftechnik

Wolfgang Seidel

Werkstoffe - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung

ISBN 3-446-40789-8

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter  
<http://www.hanser.de/3-446-40789-8> sowie im Buchhandel

**Übung 12.2–7**

Was versteht man unter der Härte eines Werkstoffes?

**Übung 12.2–8**

Weshalb ist das Härteprüfverfahren nach Brinell für gehärtete Stähle nicht geeignet?

**Übung 12.2–9**

Wie kann man die Härte dünner Bleche oder nitrierter Randzonen von Werkstücken zuverlässig ermitteln?

**Übung 12.2–10**

Wie unterscheidet sich das Prüfprinzip nach Rockwell (HRC) von den anderen klassischen Eindringverfahren nach Brinell und Vickers?

### 12.2.3 Zähigkeitsprüfung

**Lernziele**

Der Lernende kann ...

- das Bruchverhalten metallischer Werkstoffe bei schlagartiger Beanspruchung und unter Wirkung eines Kerbes erläutern,
- den Einfluss einer Kerbe auf den Spannungszustand im Bauteil beschreiben,
- das Versuchsprinzip des Kerbschlagbiegeversuches erklären,
- die Übergangstemperatur beim Kerbschlagbiegeversuch bestimmen.

#### 12.2.3.0 Übersicht

Vom Zugversuch ist bekannt, dass sich ein Großteil der metallischen Werkstoffe plastisch verformen lässt. Ist der Zugstab gekerbt, sind die erreichbaren Bruchdehnungen in der Regel viel kleiner. Wird der Kerb schärfer, d. h. der Kerbradius kleiner, kann es sogar zum *spröden Versagen* kommen (*Sprödbbruch*). Allein die Wirkung des Kerbes kann den Übergang vom gut verformbaren, zähen Werkstoffverhalten zum spröden Werkstoffversagen ohne Anzeichen einer plastischen Verformung führen. Verstärkt wird dieser Trend durch höhere Belastungsgeschwindigkeiten und niedrige Temperaturen. Typische Kerben in der Praxis sind Geometrieübergänge an kraft- und momentenübertragenden Bauteilen wie z. B. an Wellen (u. a. Passfedernuten). Die *schärfste Kerbform* in einem realen Bauteil ist ein *Anriss*. *Zähigkeitsuntersuchungen* sollen die Neigung eines Werkstoffes zum Sprödbbruch unter gleichzeitiger Wirkung einer Kerbe/eines Anrisses untersuchen. Es soll festgestellt werden, ob ein Werkstoff in der Lage ist, Spannungsspitzen an der Rissspitze durch plastische Verformung abzubauen.

Wirkt auf einen geraden Zugstab eine Kraft in axialer Richtung, so sind die Kraftfeldlinien gerade und gleichmäßig verteilt (Bild 12.2–27a). Das hat zur Folge, dass auch die größte Normalspannung in der Ebene senkrecht zur angreifenden Kraft überall gleich groß ist. Die Nennspannung  $\sigma_{nenn}$  (Kraft bezogen auf den kleinsten Querschnitt) ist gleich der Maximalspannung  $\sigma_{max}$ . Da nur eine Normalspannung auftritt, spricht man von einem *einachsigen Spannungszustand*. Ist dagegen der Zugstab gekerbt, müssen die Kraftfeldlinien den Kerb umgehen (Bild 12.2–27b). Im Kerbgrund ist die Dichte der Kraftfeldlinien höher als im Kern des Zugstabes. Das hat *Spannungsspitzen*  $\sigma_{max}$  im Kerbgrund in axialer Richtung zur Folge. Gleichzeitig werden die normalerweise axial verlaufenden Kraftfeldlinien in radialer Richtung nach Innen abgelenkt. Das führt zu einer *radialen Spannung*. Betrachtet man einen Schnitt im Kerbgrund (Bild 12.2–28), so wird deutlich, dass die Kraftfeldlinien nicht nur radial abgelenkt werden, sondern dass diese außerdem ihren Abstand in Umfangsrichtung (tangentiale Richtung) ändern müssen. Es tritt zusätzlich noch eine *tangentiale Spannung* auf. Obwohl nur eine einzige Kraft in axialer Richtung angreift, führt der Kerb zu drei wirkenden Spannungen. Solange sich der Werkstoff nicht plastisch verformt, führt die größere Dichte der Kraftfeldlinien im Kerbgrund zu Spannungsspitzen in allen drei Raumrichtungen. Dabei handelt es sich immer um Zugspannungen.

Bei der Beschreibung des Zugversuches wurde darauf hingewiesen, dass die Verlängerung der Probe mit der Abnahme des Querschnittes verbunden ist. Wird aber der Werkstoff, wie im Kerbgrund, allseitig auseinander gezogen, so kann er sich nicht mehr ohne weiteres plastisch verformen. Die *Querkontraktion wird behindert*. Wenn eine Probe/ein Werkstück gekerbt ist, dann ist diese

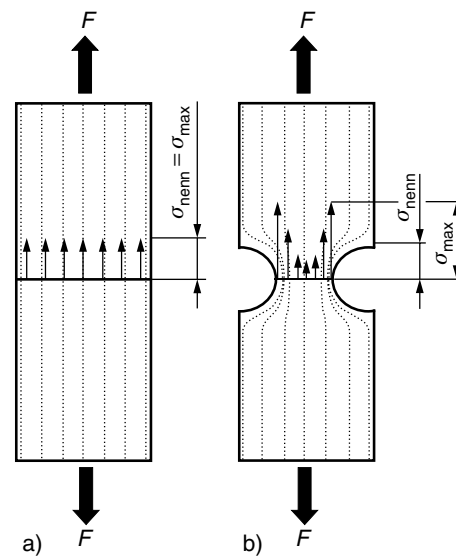


Bild 12.2–27 Verlauf der Kraftfeldlinien und Verteilung der axialen Spannung im  
a) geraden und  
b) gekerbten Zugstab

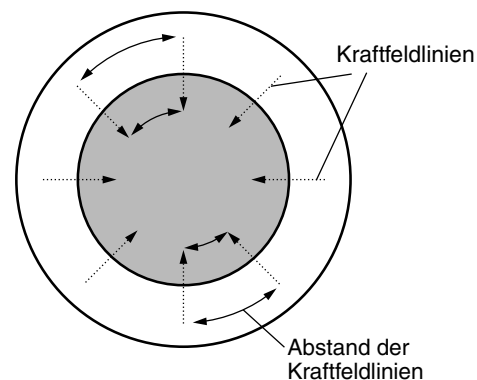


Bild 12.2–28 Schnitt im Kerbgrund einer Zugprobe – Im Kerb werden die Kraftfeldlinien in radialer Richtung abgelenkt und in Umfangsrichtung dichter zusammen gedrängt – Ursache für Radial- und Tangentialspannung im Kerbgrund

Verformungsbehinderung die Ursache für die Versprödung eines Werkstoffes. Ist ein Werkstoff in der Lage, sich unter diesen Bedingungen trotzdem plastisch zu verformen, dann hat er eine hohe *Zähigkeit*. Er ist in der Lage, die *Spannungsspitzen* im Kerbgrund durch plastische Verformung abzubauen. Spröde Werkstoffe sind dazu nicht in der Lage. Der Riss breitet sich schlagartig aus, ohne dass das Bauteil/Werkstück ein Anzeichen von plastischer Verformung zeigt (Spröd- bzw. Trennbruch).

Kerben erhöhen die *Riss- und Sprödbruchgefahr*. Kerben an Maschinenbauteilen sind Bohrungen, Passfedernuten, Gewinde und Absätze. Sie können aber auch durch Bearbeitungsfehler (z. B. Schleifrisse, Drehriefen) entstehen. Materialfehler wie Lunken, spröde nichtmetallische Einschlüsse oder spröde Gefügebestandteile wirken wie innere Kerben und haben die gleiche versprödende Wirkung.

*Zähigkeit* ist das Vermögen eines Werkstoffes, Spannungsspitzen im Kerbgrund/ an der Risspitze durch plastische Verformung abzubauen. Durch Kerben in einem Bauteil werden die Zähigkeit und das Verformungsvermögen eines Werkstoffes beeinträchtigt.

### 12.2.3.1 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Der *Kerbschlagbiegeversuch* ist für die Ermittlung der *Sprödbruchneigung* an metallischen und hochpolymeren Werkstoffen gut geeignet. Der *Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy* und die dazugehörigen Proben (Bild 12.2–29) sind in der DIN EN 10045 genormt. Die V-Kerb-Probe ist aufgrund der höheren Kerbwirkung zu bevorzugen.

Eine einseitig, in der Mitte gekerbte Probe wird auf zwei Auflager und mit der gekerbten Seite gegen zwei Widerlager gelegt (Bild 12.2–30). Durch einen herabfallenden Pendelhammer wird die Probe mit einem einzigen Schlag entweder durchgebrochen oder durch die Widerlager gezogen. Der Pendelhammer erreicht beim Auftreffen eine Schlaggeschwindigkeit von ca. 5 m/s.

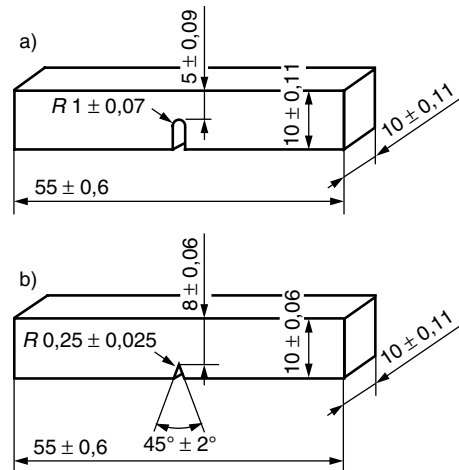


Bild 12.2–29 Kerbschlagbiegeproben nach DIN EN 10045

a) Probe mit U-Kerb; b) Probe mit V-Kerb

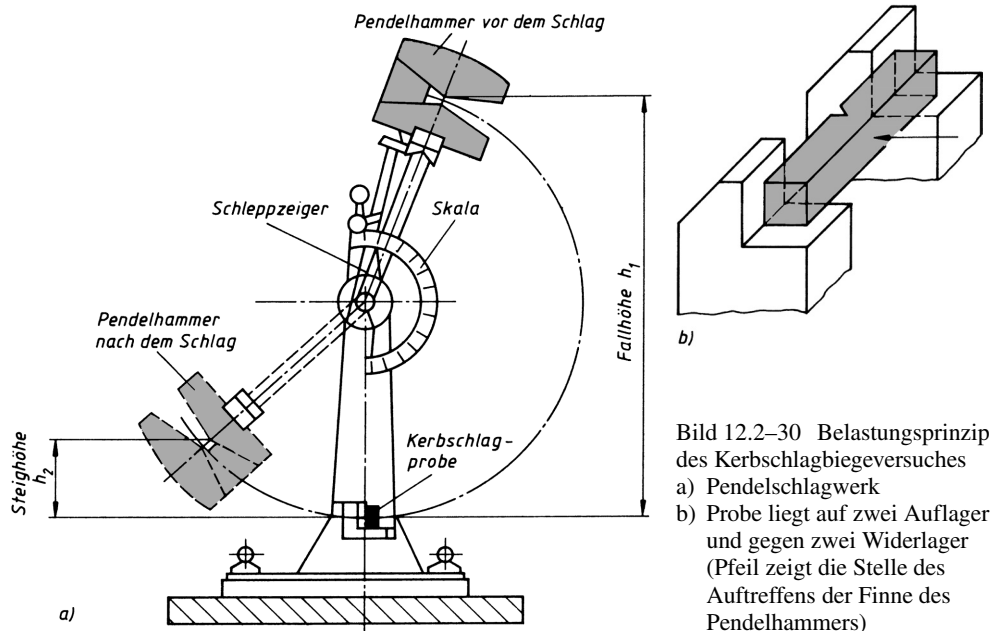


Bild 12.2–30 Belastungsprinzip des Kerbschlagbiegeversuches  
 a) Pendelschlagwerk  
 b) Probe liegt auf zwei Auflagern und gegen zwei Widerlager (Pfeil zeigt die Stelle des Auftreffens der Finne des Pendelhammers)

Beim Auftreffen der Finne wird die Probe gebogen. Bei der Biegung treten Druck- und Zugspannungen auf. Insbesondere im Kerbgrund der Probe liegen Zugspannungsspitzen vor. Diese Belastung wird durch die Spannungsmehrachsigkeit im Kerbgrund verschärft. Kann ein Werkstoff diese Belastung nicht durch plastische Verformung abbauen, kommt es sofort zur Rissbildung und zur schlagartigen Ausbreitung des Anrisses. Der Werkstoff versagt *spröd*. Es wird nur wenig *Schlagarbeit* zum Bruch benötigt. Die verbrauchte Schlagarbeit ist also ein Maß für den *Widerstand eines Werkstoffes gegen die schlagartige Beanspruchung* und die kerbbedingte mehrachsige Zugbelastung.

Vor dem Versuch hat der Hammer die potenzielle Energie  $W_1 = m \cdot g \cdot h_1$  (*Fallararbeit*). In der Regel wird ein Hammer verwendet, der ein Arbeitsvermögen von 300 J hat (auch 100 J oder 150 J sind möglich). Während der Hammer einen Kreisbogen beschreibt, wird die potenzielle in kinetische Energie umgewandelt. Ein Teil dieser kinetischen Energie wird für das Zerschlagen der Probe benötigt.

#### Kerbschlagarbeit

= Fallarbeit – Steigarbeit

$$A_v = W_1 - W_2 = m \cdot g \cdot (h_1 - h_2)$$

$m$  Masse des Pendelhammers in kg

$g$  Erdbeschleunigung in  $\text{m/s}^{-2}$

$h_1$  Fallhöhe in m

$h_2$  Steighöhe in m

Angabe der Kerbschlagarbeit:

Beispiel 1: KV = 121 J bedeutet

- Arbeitsvermögen des Pendelschlagwerkes ist 300 J (muss nicht extra angegeben werden)
- Normalprobe mit V-Kerb
- beim Bruch verbrauchte Schlagarbeit (Kerbschlagarbeit) ist 121 J

Beispiel 2: KU 150 = 65 J bedeutet

- Arbeitsvermögen des Pendelschlagwerkes ist 150 J
- Normalprobe mit U-Kerb
- beim Bruch verbrauchte Schlagarbeit (Kerbschlagarbeit) ist 65 J

Das hat zur Folge, dass der Hammer nicht mehr die ursprüngliche Höhe erreichen kann. Die *Steigarbeit* ergibt sich mit  $W_2 = m \cdot g \cdot h_2$ . Die *Kerbschlagarbeit*  $A_v$ , die notwendig ist, um die Probe zu zerbrechen oder durch das Widerlager zu ziehen, lässt sich aus der Differenz der Fallarbeit  $W_1$  und der Steigarbeit  $W_2$  des Hammers berechnen. Pendelschlagwerke besitzen normalerweise eine Skala, auf der durch die Mitnahme eines Schleppeigers direkt die von der *Steighöhe*  $h_2$  abhängige *Kerbschlagarbeit*  $A_v$  abgelesen werden kann. Viele Metalle verspröden mit sinkender Temperatur. Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy erlaubt es, mit wenigen Versuchen die Temperatur zu bestimmen, bei der ein Übergang vom *duktilen* zum *spröden Werkstoffverhalten* stattfindet (*Temperaturkonzept*). Dazu ist es erforderlich, die Proben auf definierte Temperaturen zu erwärmen bzw. abzukühlen. Nach dem Kerbschlagbiegeversuch werden die einzelnen Schlagarbeiten in ein Kerbschlagarbeit-Temperatur-Diagramm eingetragen und eine Mittelwertkurve eingezeichnet (Bild 12.2–31).

**Vorteile des Kerbschlagbiegeversuches:**

- einfache und schnelle Probenfertigung und Versuchsdurchführung
- schnelle Aussage über Spröbruchneigung möglich

**Nachteile des Kerbschlagbiegeversuches**

- die Kerbschlagarbeit ist eine *integrale Größe*, die nichts über die Rissentstehung und -ausbreitung aussagt
- die Ermittlung der Kerbschlagarbeit muss unter definierten Bedingungen erfolgen; sie ist nicht auf andere Versuchsbedingungen und in die Praxis übertragbar
- die Kerbschlagarbeit und das Bruchverhalten sind von der *Geometrie der Probe/des Kerbes* abhängig und damit ist die Kerbschlagarbeit kein Werkstoffkennwert

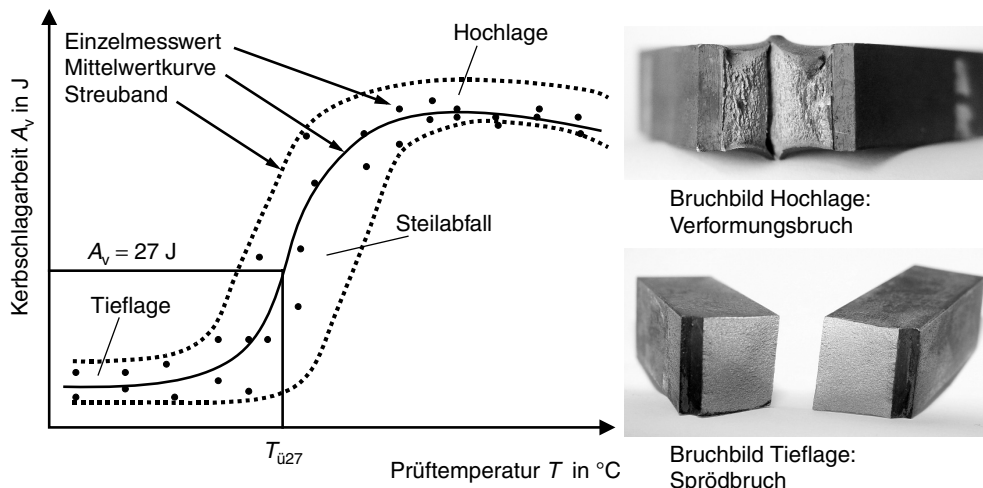


Bild 12.2–31 Kerbschlagarbeit-Temperaturkurve (schematisch); Übergangstemperatur  $T_{ü}$  bei einer bestimmten Kerbschlagarbeit  $A_v$ , z. B. 27 J

Insbesondere bei krz-Metallen (z. B. ferritisch-perlitischer Stahl, vergüteter Stahl) ergibt sich ein *charakteristischer Steilabfall* der Kurve. Er kennzeichnet den Übergangsbereich vom zähen (Hochlage) zum spröden Werkstoffverhalten (Tiefelage). Die *Übergangstemperatur*  $T_{\ddot{u}}$  gibt einen wichtigen Hinweis bis zu welcher Temperatur ein Werkstoff eingesetzt werden darf. Am häufigsten wird die Übergangstemperatur bei bestimmten vorgegebenen Kerbschlagarbeiten ermittelt. Übliche Werte sind 27 J, 40 J oder 60 J ( $T_{\ddot{u}27}$ ;  $T_{\ddot{u}40}$ ;  $T_{\ddot{u}60}$ ). Aber auch die Kerbschlagarbeit, bei der im Bruchbild erstmals nur Verformungsbruch festgestellt wird ( $T_{\ddot{u}\text{Hoch}}$ ), oder aber die Mitte des Steilabfalles ( $T_{\ddot{u}1/2}$ ) können zur Bestimmung der Übergangstemperatur herangezogen werden.

Zunehmende Kerbschärfe, Dicke und Breite der Probe und eine ansteigende Schlaggeschwindigkeit führen genauso wie ein höherer Martensitgehalt, ein zunehmender Kaltumformgrad, Gefügeinhomogenitäten oder große nichtmetallische Einschlüsse zum *Ansteigen der Übergangstemperatur* und damit zur Versprödung des Werkstoffes. Bild 12.2–32 zeigt  $A_v$ - $T$ -Kurven verschiedener Werkstoffgruppen, und Bild 12.2–33 von Stählen verschiedener Behandlungszustände.

Die Übergangstemperatur hängt nicht nur vom Werkstoffzustand, sondern auch von der *Geometrie* der Probe/des Kerbes ab. Deshalb kann sie auch nicht als Werkstoffkennwert betrachtet werden. Die Übergangstemperatur gibt einen Hinweis auf die *möglichen Einsatztemperaturen* eines Werkstoffes. Unter der Wirkung eines scharfen Risses kann sich der Werkstoff deutlich spröder verhalten. Aus diesem Grund wurde die bruchmechanische Werkstoffprüfung entwickelt (Abschnitt 12.2.4).

Der *Kerbschlagbiegeversuch* hat als Abnahmeversuch in der metallurgischen Industrie eine große Bedeutung. So werden alle allgemeinen Baustähle auf ihre Sprödbrechneigung untersucht.

#### Anwendung des Kerbschlagbiegeversuches:

- Nachweis möglicher Einsatztemperaturen
- qualitative Bewertung von Wärmebehandlungszuständen
- Untersuchung der Alterungsanfälligkeit von Werkstoffen
- Prüfung von Schweißverbindungen
- wichtiger Abnahmeversuch zur Bestimmung der Güte und Gleichmäßigkeit eines Werkstoffes bzw. seiner Behandlung in der metallurgischen Industrie und in Gießereien

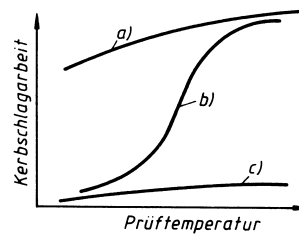


Bild 12.2–32 Kerbschlagarbeit-Temperaturkurve für verschiedene Werkstoffe

- a) Al, Cu, Ni, austenitischer Stahl (kfz-Gitter)  
 b) ferritisch-perlitischer oder vergüteter Stahl (krz-Gitter)  
 c) Glas, Keramik, gehärteter und nicht angelassener Stahl (Martensit)

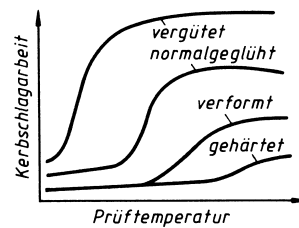


Bild 12.2–33 Kerbschlagarbeit-Temperaturkurven von Stählen in verschiedenen Behandlungszuständen (schematisch)



Nachteilig ist, dass man anhand des Wertes der Kerbschlagarbeit nicht erkennen kann, ob der Werkstoff spröde gebrochen ist oder nicht. Ein zäher Werkstoff mit einer sehr niedrigen Festigkeit kann die gleiche Kerbschlagarbeit wie ein hochfester, aber spröder Werkstoff aufweisen. Erst wenn die Schlagkraft über die Durchbiegung bestimmt wird, können zur Rissentstehung und zum Rissfortschritt genaue Aussagen getroffen werden (Bild 12.2–34). Die Fläche unter der *Kraft-Durchbiegung-Kurve* ist ein Maß für die Kerbschlagarbeit. Wird nicht nur die Kerbschlagarbeit, sondern auch die Schlagkraft-Durchbiegung-Kurve ermittelt, so handelt es sich um einen *instrumentierten Kerbschlagbiegeversuch*. Dieser ist in der DIN EN ISO 14 556 standardisiert.

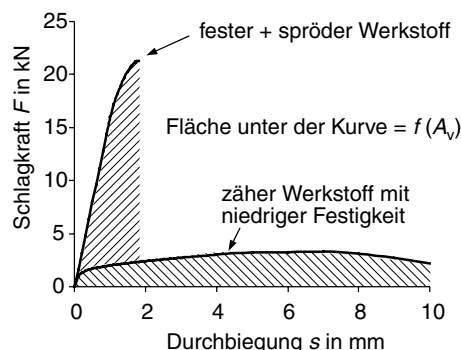


Bild 12.2–34 Vergleich von Schlagkraft-Durchbiege-Kurven

### 12.2.4 Bruchmechanische Werkstoffprüfung

Im vorangegangenen Abschnitt wurde darauf hingewiesen, dass die Kerbschlagarbeit kein Werkstoffkennwert ist, da sie von der Proben- und Kerbgeometrie abhängt. Das heißt, dass in der Praxis andere und unter Umständen härtere Bedingungen vorliegen. Geht man von unterschiedlich gekerbten Zugstäben aus, führt ein abnehmender Kerbradius zu immer größeren Spannungsspitzen  $\sigma_{max}$  und einer *zunehmenden Spannungsmehrachsigkeit* im Kerbgrund (Bild 12.2–35). Die Spannungsspitzen sind dann am größten, wenn im Werkstück ein *scharfer Anriss* vorliegt. Obwohl in jedem Werkstoff Fehler vorhanden sind, kommt es in der Technik vergleichsweise selten zum Versagen. Versagen ist ein plötzlicher und unkontrollierter Rissfortschritt (*instabile Rissausbreitung*) bis zur Trennung des Werkstoffes. Bei zähen Werkstoffen verformt sich trotz der mehrachsigen Belastung der Werkstoff an der Risspitze. Der Riss wächst nur langsam, und für die weitere Rissausbreitung ist eine zunehmende Belastung notwendig (*stabiler Rissfortschritt*). Aus diesen Beobachtungen lassen sich folgende Fragestellungen ableiten:

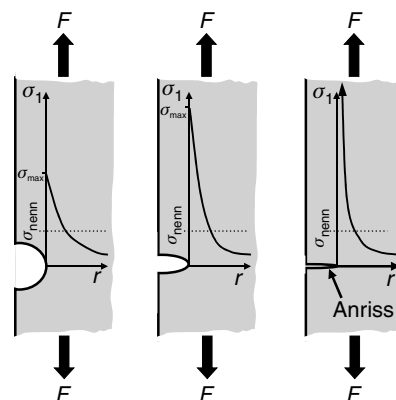


Bild 12.2–35 Einfluss des Kerbradius auf die größte Normalspannung im Kerbgrund bei rein elastischer Verformung

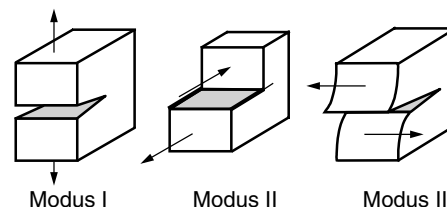


Bild 12.2–36 Grundbelastungsarten, die zum instabilen Risswachstum führen können