

Bei geringer Beanspruchung verhalten sich viele Werkstoffe rein elastisch, das heißt die Verformung ist reversibel und geht bei Entlastung vollständig zurück. Dieser Bereich zeigt sich im Spannungs-Dehnungs-Diagramm (siehe Abbildung 1.30) als Anstiegsgerade im Bereich kleiner Dehnungen; sie wird Hooke'sche Gerade genannt, da in diesem Bereich das Hooke'sche Gesetz gilt. In der Regel werden Konstruktionen so ausgelegt, dass sie in diesem rein elastischen Bereich belastet werden. Die Steigung der Hooke'schen Gerade entspricht dem *Elastizitätsmodul*  $E$  – auch kurz *E-Modul* genannt –, der ein Maß für die Steifigkeit eines Werkstoffes ist:

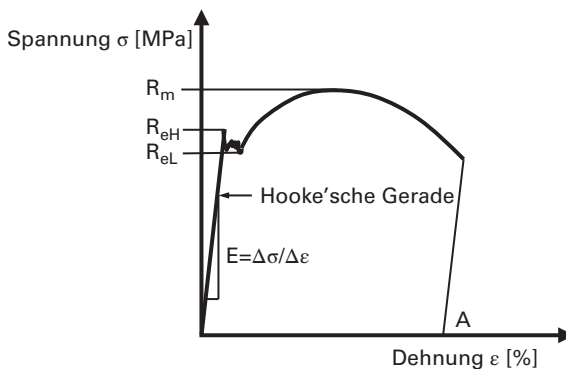
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Die im Kraft-Verlängerungs-Diagramm (siehe Abbildung 1.29) angezeigte Höchstkraft  $F_m$ , dividiert durch den Anfangsquerschnitt der Probe  $S_0$  ergibt die *Zugfestigkeit*  $R_m$ :

$$R_m = \frac{F_m}{S_0}$$

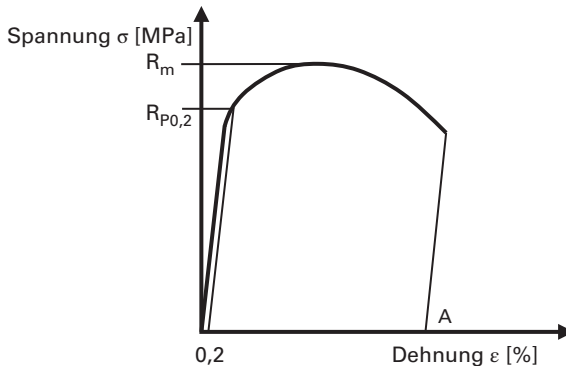
Betrachten wir das Verhalten der Spannung im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, erkennen wir die Punkte  $R_{eH}$  als *obere Streckgrenze* und  $R_{eL}$  als *untere Streckgrenze*.

Wenn das Probenmaterial nicht wie in Abbildung 1.30 eine ausgeprägte Streckgrenze aufweist (es also zu einem abrupten Spannungsabfall am Ende



**Abbildung 1.30** Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Baustahls

der Hooke'schen Gerade kommt), bestimmt man die *0,2 %-Grenze*  $R_{p0,2}$  (auch Ersatzstreckgrenze genannt) Nach DIN wird die 0,2 %-Grenze zeichnerisch durch eine Parallele zur Hooke'schen Gerade im Abstand von 0,2 % zur ursprünglichen Messlänge ermittelt (siehe Abbildung 1.31). Der Schnittpunkt mit der Spannungs-Dehnungs-Kurve gibt die Spannung  $R_{p0,2}$  an.



**Abbildung 1.31** Zeichnerische Ermittlung der Ersatzstreckgrenze  $R_{p0,2}$

### Warnung

Bei allen konstruktiven Berechnungen wird stets mit der oberen Streckgrenze gearbeitet, weil nur bis hierhin ein rein elastisches Verhalten garantiert werden kann.

Zur Bestimmung der bleibenden Verlängerung der Probe nach dem Bruch, bezogen auf die Anfangsmesslänge, der *Bruchdehnung*  $A$  wird die zerrissene Probe exakt zusammengefügt und die prozentuale Verlängerung bezogen auf die Anfangslänge bestimmt.

## Eine zähe Sache – der Kerbschlagbiegeversuch

Zur Auswahl eines für eine bestimmte Anwendung geeigneten Werkstoffes wird neben den mechanischen Kennwerten aus dem Zugversuch häufig noch das Ergebnis des Kerbschlagbiegeversuches benötigt. Die Verwendung eines Materials, das seinen Anforderungen nicht gerecht wird, kann fatale Folgen haben. Kommen Kälte und starke Krafteinwirkungen zusammen, wird mancher Stahl

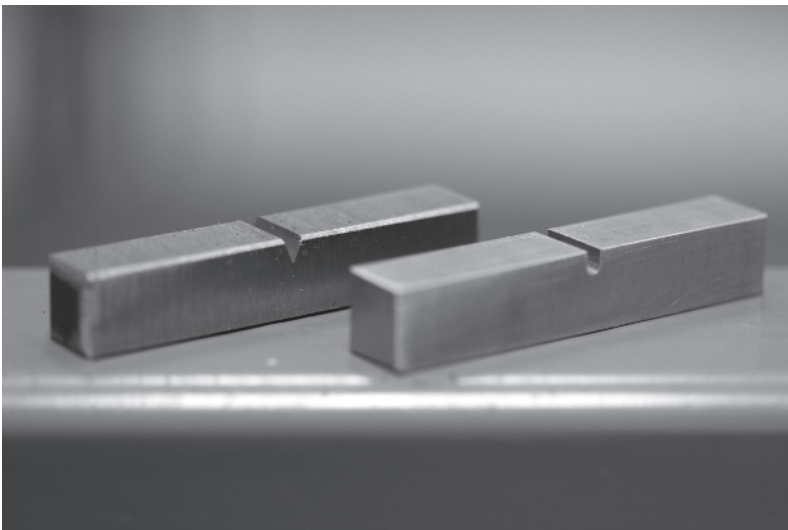
spröde und bricht. Bei dem sehr kalten und schneereichen Winter im Jahr 2005 brachen deshalb beispielsweise zahlreiche Strommasten zusammen.

Wie der Zugversuch, ist auch der Kerbschlagbiegeversuch eine zerstörende Werkstoffprüfung. Er gibt Auskunft über die Widerstandsfähigkeit des Werkstoffes gegen schlagartige Beanspruchung. Die *Zähigkeit* als die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffs gegen Bruch oder Rissausbreitung hängt dabei von drei Faktoren ab:

- der Temperatur,
- der Kerbform
- und der Zusammensetzung des Materials bzw. der sich daraus ergebenden Gitterstruktur.

Die Proben für den Kerbschlagbiegeversuch besitzen eine Länge von 55mm und einen quadratischen Querschnitt von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ . Die Proben werden eingekerbt, um den Bruchvorgang besser steuern zu können. Dabei können zwei unterschiedliche Kerbformen verwendet werden:

- die *V-Kerbe* und
- die *U-Kerbe* (siehe Abbildung 1.32).



**Abbildung 1.32** Probenformen beim Kerbschlagbiegeversuch

Da die Zähigkeit eines Werkstoffes auch von seiner Temperatur abhängt, werden die Proben im Klimaschrank erst auf die entsprechende Temperatur gebracht und dann unmittelbar vor dem Versuch heraus genommen. Dann wird die Probe mit der Kerbe in Schlagrichtung im Pendelschlagwerk platziert (Abbildung 1.33) und der Pendelhammer ausgelöst. Durchschlägt der Pendelhammer die Probe, wird ein Teil seiner kinetischen Energie durch Verformungsprozesse absorbiert. Deshalb schwingt der Hammer auf der anderen



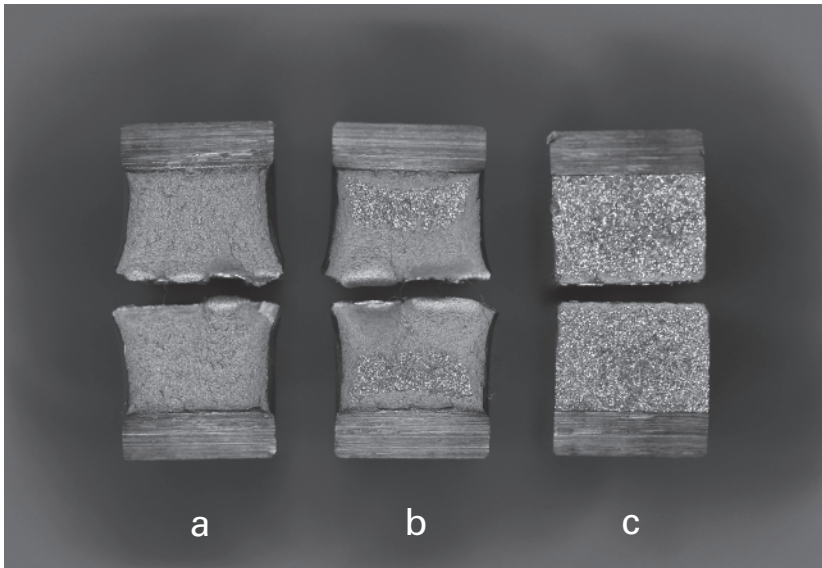
**Abbildung 1.33** Kerbschlagbiegeversuch

Seite weniger hoch. Aus der Differenz zwischen Anfangs- und Endhöhe des Pendels berechnet sich die Kerbschlagarbeit einer Werkstoffprobe. Sie wird in Joule angegeben und an der Skala des Prüfgerätes abgelesen.

Es gibt zwei verschiedene Brucharten:

- *Trennbrüche* und
- *Verformungsbrüche*

Einige metallische Werkstoffe (z.B. Baustähle mit krz-Gitter) neigen dazu, bei tiefen Temperaturen zu verspröden. Werden solche Werkstoffe bei tiefen Temperaturen im Kerbschlagbiegeversuch geprüft, kommt es zu einem Trennbruch, bei dem die Probe glatt durchbricht und die Bruchfläche ein feinkristallines Aussehen hat (siehe Abbildung 1.34 c). Zähre Werkstoffe verformen sich zunächst, bevor sie brechen. Solche Verformungsbrüche erkennt man an den deformierten Kanten (siehe Abbildung 1.34 a). Es gibt aber auch Proben, die neben feinkristallinen Bereichen Verformungsstellen aufweisen (siehe Abbildung 1.34 b); man bezeichnet diese Form dann als *Mischbruch*.



**Abbildung 1.34** Brucharten

Da die Kerbschlagarbeit stark von der Temperatur abhängen kann, werden die gemessenen Werte gegen die Temperatur aufgetragen (siehe Abbildung 1.35). Die Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve lässt sich in drei Bereiche einteilen:

1. *Hochlage*
2. *Steilabfall*
3. *Tieflage*

Die Hochlage beschreibt eine gute Zähigkeit bei hohen Temperaturen. In der Hochlage treten Verformungsbrüche auf. Die Tieflage weist niedrige Kerbschlagzähigkeitswerte bei tiefen Temperaturen auf. Das Material bricht glatt durch; d.h. es kommt zu Trennbrüchen. Der Steilabfall beschreibt den Übergangsbereich zwischen Hoch- und Tieflage. Im Steilabfall streuen die gemessenen Werte stark; hier kommt es zu Mischbrüchen.

Wie bereits im Abschnitt „Rutschpartie – Gleitebenen, Gleitsysteme“ erläutert wurde, zeigt sich der Unterschied zwischen kfz-Metallen und krz-Metallen besonders deutlich bei temperaturabhängiger schlagender Beanspruchung. Besonders bei Metallen, die über keine dichtest gepackten Gleitebenen verfügen, steigt der Gleitwiderstand bei sinkender Temperatur stark an. Mit der Variation der Versuchstemperatur erhält man nach der Auswertung der Versuche deutliche Hinweise auf eine eventuell vorhandene *Übergangstemperatur*  $T_U$  (siehe Abbildung 1.35). Da die Kenntnis der Übergangstemperatur von duktilem (plastisch verformbaren) zu sprödem Werkstoffverhalten für die Werkstoffauswahl von entscheidender Bedeutung sein kann, wird sowohl die

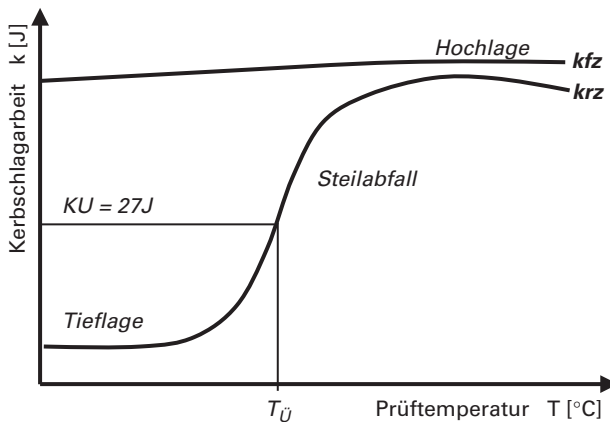


Abbildung 1.35 Kerbschlagarbeit-Temperatur-Kurve

Temperatur, als auch der erzielte Wert für die Kerbschlagarbeit (in unserem Beispiel aus Abbildung 1.35 KU = 27 J) in der Werkstoffbezeichnung (vor allem bei Baustählen) mit angegeben. Wie dies genau geschieht, wird im nächsten Kapitel „Bezeichnung der Stähle“ erläutert.

#### AUF EINEN BLICK

- Atome bestehen aus negativ geladenen Elektronen, positiv geladenen Protonen und neutralen Neutronen.
- Für die Bindungsarten spielen die Außenelektronen die entscheidende Rolle.
- Alle Atome streben den Edelgaszustand einer gefüllten äußeren Elektroschale an.
- Man unterscheidet die Elemente in Metalle, Halbmetalle und Nichtmetalle. Je nachdem, welche Atomsorten miteinander eine Bindung eingehen, bilden sich Elektronenpaarbindungen, Ionenbindungen oder Metallbindungen
- Sowohl die Gittertypen der metallischen Werkstoffe als auch Art und Anzahl der Gitterfehler haben entscheidende Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften.
- Ursache für die gute plastische Verformbarkeit metallischer Werkstoffe bei relativ geringem Kraftaufwand sind Versetzungen. Besonders geeignet für die Bewegung von Versetzungen sind Gleitebenen.
- Die plastische Verformbarkeit von kfz-Metallen ist besser als die von krz-Metallen und erst recht als die von hdp-Metallen.
- Die wichtigsten mechanischen Eigenschaften wie E-Modul und Streckgrenze werden im Zugversuch ermittelt.
- Die Widerstandsfähigkeit eines Werkstoffes gegen schlagartige Beanspruchung wird im Kerbschlagbiegeversuch untersucht.

## Übungsaufgaben

Diese Übungsaufgaben sollen Ihnen helfen, zu reflektieren, ob Sie den gelesenen Stoff verstanden und verinnerlicht haben. Versuchen Sie die Lösungen so gut es geht zu erarbeiten, ohne nachzuschlagen. Die Musterlösungen für die folgenden Übungsaufgaben finden Sie als Download unter

[www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN3-527-53023-1](http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN3-527-53023-1).

### Aufgabe 1

Erklären Sie unter Zuhilfenahme der Perioden und Hauptgruppen des Periodensystems der Elemente, welche Atome zu den Metallen und welche zu den Nichtmetallen gerechnet werden.

### Aufgabe 2

Welche Bindungsarten kennen Sie? Wie gut lassen sich die resultierenden Werkstoffklassen plastisch verformen? Begründen Sie Ihre Antwort.

### Aufgabe 3

Berechnen Sie die Packungsdichte in einem kubisch flächenzentrierten Gitter.

### Aufgabe 4

Benennen und beschreiben Sie drei nulldimensionale Gitterfehler.

### Aufgabe 5

Sortieren Sie krz, hdp und kfz nach ihrer plastischen Verformbarkeit. Begründen Sie Ihre Antwort.

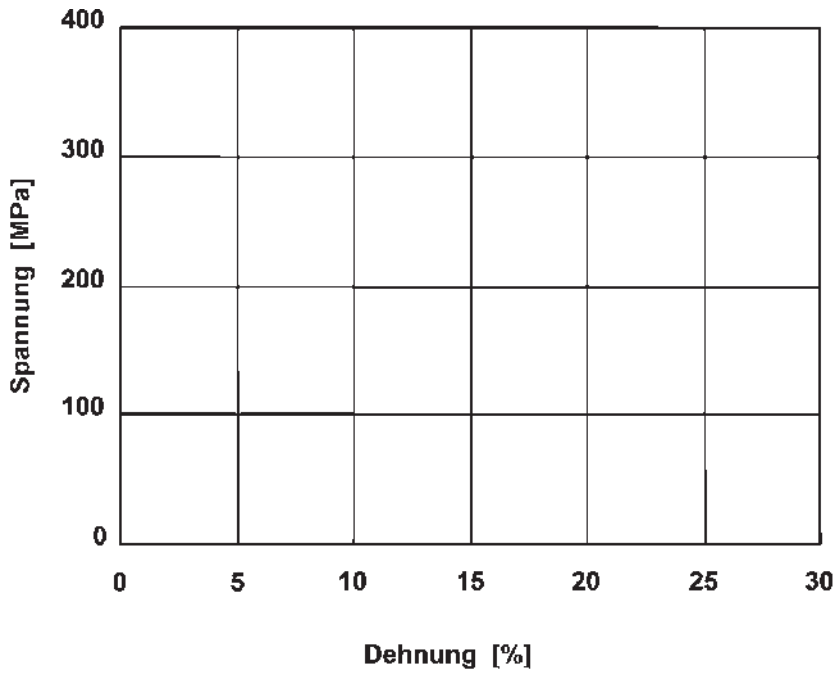
### Aufgabe 6

Gegeben ist ein Probenstab aus Baustahl mit einer Anfangsmesslänge von  $l_0 = 60 \text{ mm}$ . Bei einer Zugkraft von  $14250 \text{ N}$  weist er eine Dehnung von  $0,06 \%$  auf. Der E-Modul beträgt  $210 \text{ GPa}$ . Welchen Anfangsdurchmesser  $d_0$  besitzt der Probenstab?

Die plastische Verformung für den Baustahl beginnt bei  $0,115 \%$ . Die maximal angelegte Kraft beträgt  $41000 \text{ N}$  bei einer Dehnung von  $14 \%$ . Die Probe bricht bei  $245 \text{ MPa}$  und weist eine Bruchlänge von  $76,5 \text{ mm}$  auf. Skizzieren Sie die Spannungs-Dehnungs-Kurve für diesen Werkstoff.

Hinweis: Tragen Sie die gegebenen und errechneten Punkte ein und vervollständigen Sie die Kennlinie qualitativ. Kennzeichnen Sie die charakteristischen Werte.





### Aufgabe 7

Von welchen drei Faktoren hängt die Zähigkeit bei schlagartiger Beanspruchung ab?

