

## Biege- und Härtemess-Versuch

### 1 Lerninhalte

Ein Stück Knetmasse hat immer die gleiche Festigkeit, auch wenn es bereits verformt wurde. Das ist bei Metallen anders: Die Festigkeit hängt von der "Vorgeschichte" ab. Reines Kupfer kann sowohl butterweich, als auch knochenhart sein.

Zum Verständnis dieses Phänomens werden Versuche an unterschiedlich behandelten Kupferblechen durchgeführt. Dabei lernen die Schüler:

- Mechanismen von Ver- und Entfestigung
- grundlegende Verfahren der zerstörenden Werkstoffprüfung (Biege-, Härteeindruckversuch)
- einfache Messverfahren für die Kraft- und Wegmessung

#### 1.1 Kristalline Struktur von Metallen

Metalle bilden diejenigen chemischen Elemente, die sich im Periodensystem der Elemente links und unterhalb einer Trennungslinie von Bor bis Astat befinden. Das sind etwa 80 Prozent der chemischen Elemente, wobei der Übergang zu den Nichtmetallen über die Halbmetalle fließend ist. Häufig wird der Begriff auch für Legierungen, intermetallische Phasen und die metallischen Modifikationen von Nicht- oder Halbmetallen verwendet, wenn diese in fester oder flüssiger Form die folgenden vier charakteristischen metallischen Stoffeigenschaften aufweisen:

- elektrische Leitfähigkeit, die mit steigender Temperatur abnimmt,
- hohe Wärmeleitfähigkeit,
- Duktilität (Verformbarkeit) und
- metallischen Glanz (Spiegelglanz).

Alle diese Eigenschaften beruhen darauf, dass der Zusammenhalt der betreffenden Atome mit der metallischen Bindung erfolgt, deren wichtigstes Merkmal die im Gitter frei beweglichen Elektronen sind. Ein einzelnes Atom dieser Elemente hat keine metallischen Eigenschaften; es ist kein Metall. Erst wenn mehrere solcher Atome in einem Kristallgitter angeordnet sind besteht zwischen ihnen eine metallische Bindung und dann zeigen solche Atomgruppen metallische Eigenschaften.

Das *Kristallgitter*, auch *Punktgitter* genannt, ist eine dreidimensionale Anordnung von Punkten. Untereinheit des Gitters ist die sogenannte Elementarzelle (Abbildung 1). Sie enthält alle Informationen die zum Beschreiben des Kristalls notwendig sind. Diese Elementarzellen werden durch aneinandersetzen zu einem dreidimensionalen Netz erweitert (

Abbildung 2). Das Kristallgitter ist ein Hilfsmittel, um die Symmetrie und Geometrie eines Kristalls zu beschreiben.

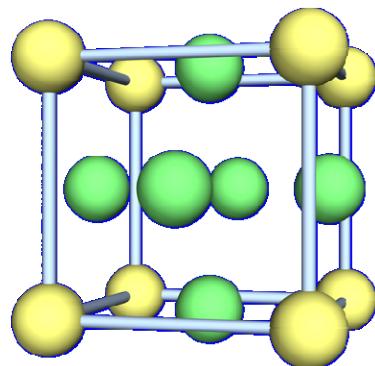


Abbildung 1: Einheitszelle eines (kubisch flächenzentrierten) Kristalls

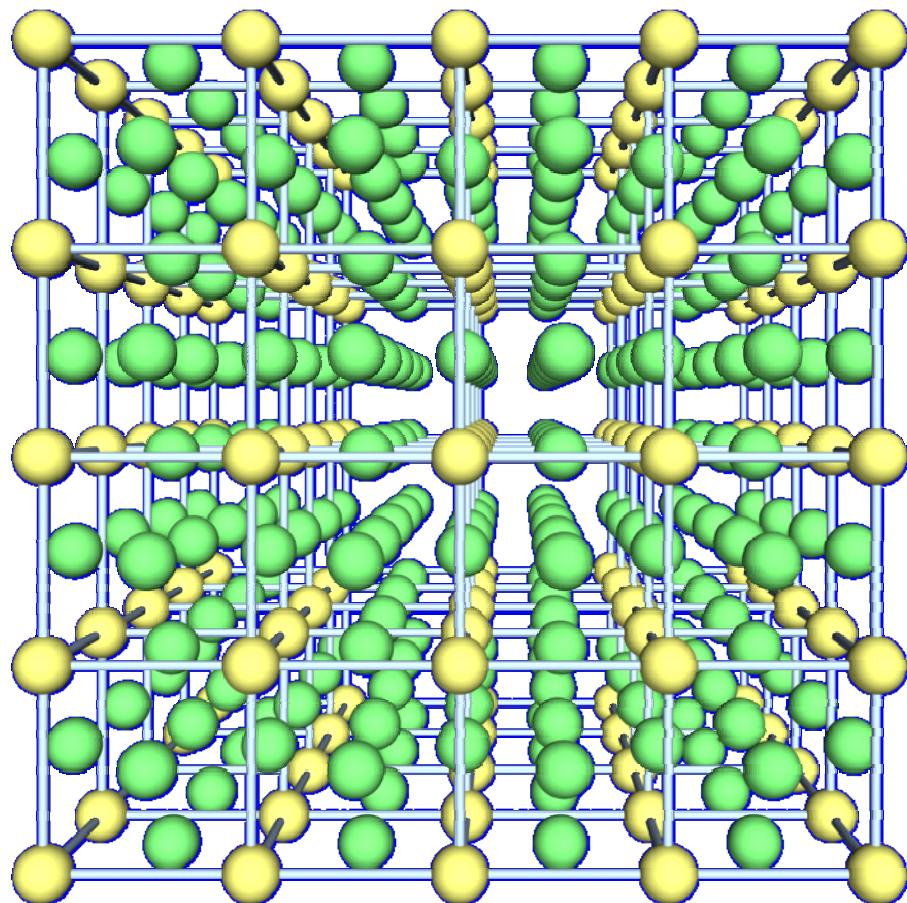
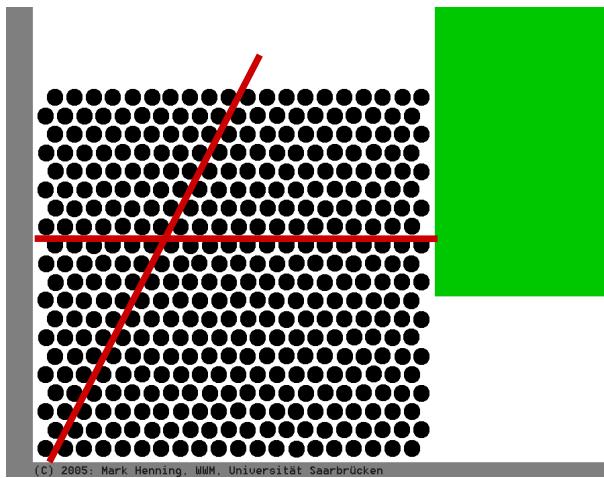


Abbildung 2: Situation in einem Metall: aus vielen Einheitszellen aufgebaut

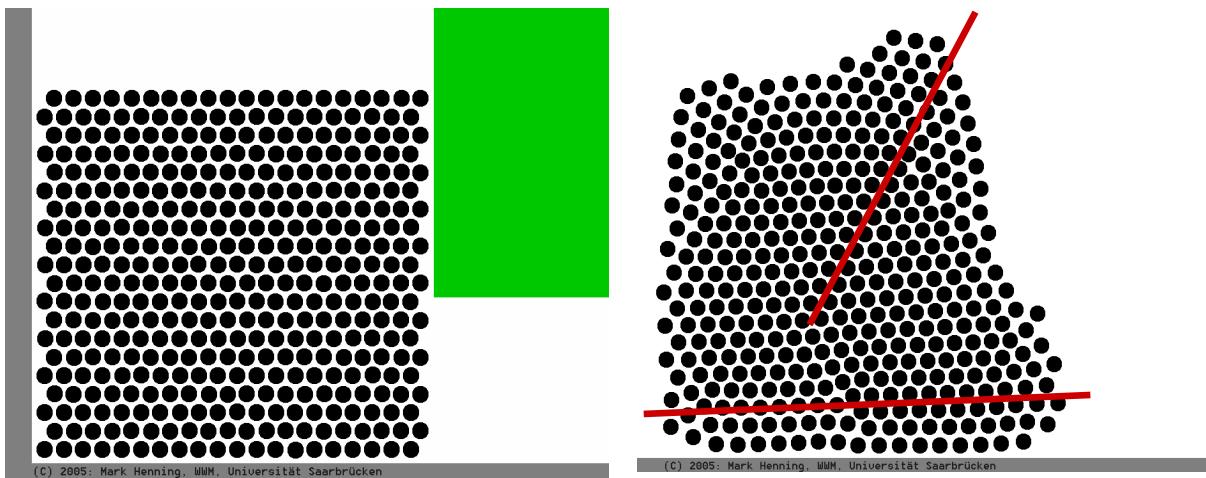
## 1.2 Verformung und Verfestigung

Betrachtet man sich das Kristallgitter zur Vereinfachung zweidimensional sieht das Gitter wie in der Abbildung 3 gezeigt aus. Bei einer unverformten Probe findet man aufgrund der periodischen Anordnung des Gitters Ebenen durch die man eine Linie zeichnen kann ohne die als Schwarze Punkte gezeichneten Atome zu schneiden.



**Abbildung 3:** Unverformte Probe. Exakte periodische Anordnung der Atome im Kristallgitter

Verformt man die Probe nun, verändern die Atome aufgrund der von außen einwirkenden Kraft ihre Positionen. Das Gitter ist nun gestört. Nimmt man die von außen wirkende Kraft wieder weg, bewegen sich die Atome zwar ein wenig zurück, sie erreichen aber ihre Ausgangsposition nicht mehr. Man sagt die Verformung ist plastisch. Versucht man nun wiederum Atomebenen als Linie zu zeichnen, stellt man fest, dass die vorher vorhandenen Linien verschoben sind und auch Atome schneiden.

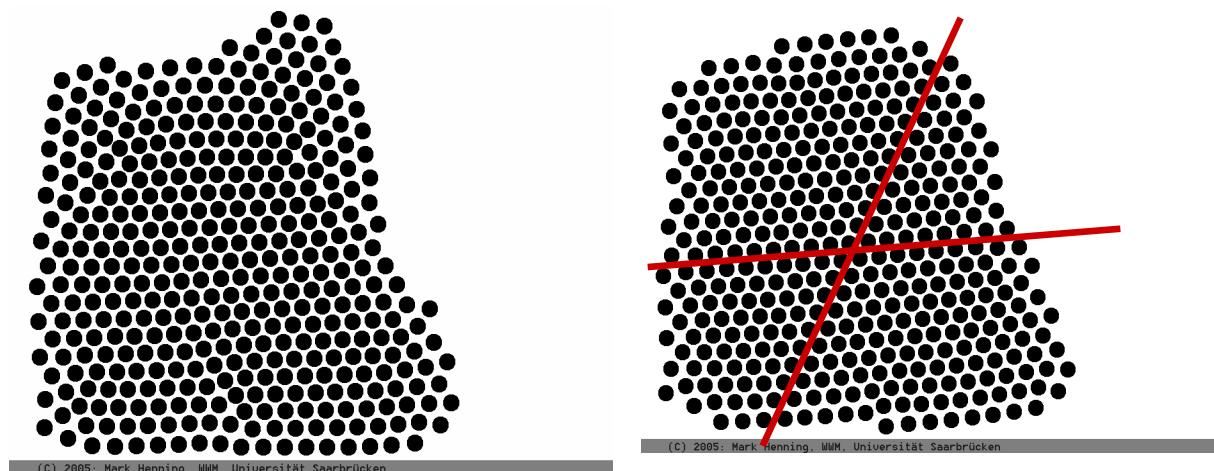


**Abbildung 4:** Ablauf der Verformung: Als Beispiel für eine Verformung wird ein Stempel (grün) auf die Probe (von rechts nach links) gedrückt.

### 1.3 Auswirkungen von Weichglühen

Weichglühen ist ein Verfahren der Wärmebehandlung von Metallen, bei dem durch Glühen die Verformbarkeit oder andere Materialeigenschaften verbessert werden. Das Material – in unserem Fall beispielsweise Kupfer wird dabei erhitzt und dann einige Zeit bei erhöhter Temperatur gehalten. Dann lässt man langsam abkühlen. Das Weichglühen verringert die Härte und erleichtert dadurch weitere Verarbeitungsschritte wie Walzen, Drahtziehen oder Stanzen beträchtlich, gerade auch weil vermieden wird, dass sich dabei Risse bilden.

In unserem Fall handelt es sich um ein Kupferblech, dass während seiner Produktion gewalzt wurde, also bereits wie oben beschrieben vorverformt ist. Wir greifen die Probe nun mit einer Zange und halten sie über ein Feuerzeug. Die Temperatur des Feuerzeugs reicht aus um die Probe zu glühen. Glüht man die Probe, so bringt man Energie ein, die es den Atomen ermöglicht sich zu bewegen (Abbildung 5). So ist es möglich, dass sich die Atome wieder in ihre geordnete Form zurückbewegen, da diese von der Energie her günstiger ist.



**Abbildung 5:** Weichglühen der Probe: die Atome bewegen sich wieder in ihre geordnete Form

---

## 2 Härteeindruckversuch

Um zu untersuchen welche mechanischen Eigenschaften Proben oder auch Bauteile besitzen bieten sich mechanische Prüfungen an. Eine dieser Prüfmethoden ist die Härtemessung bei der die Eigenschaft Härte bestimmt wird.

### 2.1 Grundlagen der Härteprüfung

Allgemein versteht man nach Martens unter der Härte eines Werkstoffs den mechanischen Widerstand, den der Werkstoff beim Eindrücken eines Prüfkörpers (auch Indenter genannt) entgegenseetzt. Aufgrund der Härtemessung ist auch eine Aussage über die Festigkeit des Werkstoffs möglich, aber die Definition der Härte ist eine andere als die der Festigkeit, welche die Widerstandsfähigkeit eines Stoffes gegenüber Verformung und Trennung zum Mittelpunkt hat.

Die Härte spielt besonders beim Verschleißverhalten eine große Rolle. Harte Brillengläser zerkratzen weniger leicht, harte Zahnräder nutzen sich langsamer ab. Die Härte lässt sich nur durch den Vergleich von mehreren Werkstoffen oder Werkstoffzuständen ermitteln. Es gibt also verschiedene Messverfahren mit unterschiedlichen Härteskalen, die untereinander nicht vergleichbar sind.

Das einfachste Verfahren ist die Härteprüfung nach Mohs (Friedrich Mohs, 1773-1839) bei dem ausgenutzt wird, dass harte Werkstoffe weiche ritzen. Mohs ritzte verschiedene Minerale gegeneinander und ordnete sie so nach ihrer Härte woraus die Mohs-Skala (Tabelle 1) entstand. Jedes Mineral ritzt das niedrigere und wird selbst vom höheren geritzt.

Tabelle 1: Härteskala nach Mohs

Mineral	Mohs-Härte	Vickers-Härte	Bemerkung
Talk	1	2,4	mit Fingernagel schabbar
Gips, Steinsalz	2	36	mit Fingernagel ritzbar
Calcit	3	109	mit Kupfermünze ritzbar
Flussspat	4	189	mit Messer leicht ritzbar
Apatit	5	536	mit Messer noch ritzbar
Feldspat	6	795	mit Stahlfeile ritzbar
Quarz	7	1.120	ritzt Fensterglas
Topas	8	1.427	
Korund	9	2.060	
Diamant	10	10.060	härtestes natürlich vorkommendes Mineral

Zu beachten ist hierbei dass sich Graphit leicht ritzen lässt, Diamant aber der härteste Werkstoff ist wobei es sich bei beiden chemisch um reinen Kohlenstoff handelt.

So einfach dieses Verfahren ist, so wenig aussagekräftig ist es für Metalle. Metalle ähnlicher Härte erzeugen Kratzspuren aufeinander, so dass keine eindeutige Härtemessung möglich ist. Daher sind Verfahren notwendig, die genauere Messungen zulassen. Diese Verfahren

---

werden Werte liefern die um einige Größenordnungen von den Werten der Mohs-Skala abweichen.

Historisch gesehen gab es weitere Verfahren wie den Poldi-Hammer, bei dem Mitarbeiter des Stahlwerks mit einem Hammer auf einen Aufsatz auf einer Stahlplatte schlugen. Im Aufsatz befanden sich zwei Schlagbolzen, die jeweils einen Eindruck auf der Stahlplatte und auf einem Material bekannter Härte hinterließen. Aus dem Vergleich dieser Eindrücke konnte die Härte des Werkstücks ermittelt werden. Allerdings war das Verfahren nicht sehr präzise, da die Kraft mit der auf den Aufsatz geschlagen wurde für verschiedene Messungen unterschiedlich groß war.

Heute benötigt man weit präzisere Verfahren. Die Verfahren die heutzutage in der Industrie verwendet werden sind Eindruckverfahren. Ein genau bestimmter Prüfkörper wird mit einer bestimmten Kraft eine vorgegebene Zeit in den Werkstoff eingedrückt. Anhand des Eindrucks kann dann über die Härte des Werkstoffs entschieden werden. Bei harten Werkstoffen ergeben sich kleine Eindrücke bei weichen Werkstoffen große.

Das älteste dieser Verfahren ist die Härteprüfung nach Brinell (1900). Dabei wird eine Kugel aus Hartmetall in den Werkstoff eingedrückt. Die Härte ist dann definiert als Quotient aus Prüfkraft und Oberfläche des Eindrucks. Der Durchmesser des Eindrucks soll zwischen 0,2 und 0,7 mal dem Durchmesser der Hartmetallkugel liegen, dann kann aus diesem Durchmesser und dem Durchmesser der Kugel die Oberfläche des Eindrucks berechnet werden. Für verschiedene Werkstoffe gibt es Normen für die Kombinationen aus Durchmesser und Prüfkraft. Das Verfahren eignet sich allerdings nur zur Prüfung relativ weicher Werkstoffe, denn wenn die Hartmetallkugel bei hohen Prüfkräften verformt wird, werden auch die Eindrücke andere Oberflächen aufweisen. Dann muss die Messung korrigiert werden.

Bei der Rockwell-Härteprüfung (1931) wird nicht der Durchmesser des Eindrucks sondern die Eindrucktiefe bestimmt. Um den Einfluss der Oberfläche auszuschalten wird zunächst die Probe zunächst leicht belastet. Dann wird die Messuhr für den Weg auf Null gestellt und die Probe mit einer definierten Kraft belastet. Das Ziffernblatt zeigt dann direkt die Härte des Werkstoffs an. Vorher wird die Kraft jedoch weggenommen, um die elastische Verformung („Zurückfedern“) der Probe und der Prüfmaschine auszugleichen. Das Verfahren ist sehr schnell, daher wird es in der Industrie bis heute noch oft verwendet.

Am häufigsten wird heutzutage die Vickers-Härteprüfung (1925) eingesetzt. Bei ihr wird eine Diamant-Pyramide mit quadratischer Grundfläche und stumpfem Winkel an der Spitze ( $136^\circ$ ) verwendet. Sie ist geeignet für härteste Stoffe und dünne Schichten. Die Eindrücke sind Quadrate, deren Diagonalen zur Bestimmung der Härte ausgemessen werden.

## 2.2 Aufbau der Härteprüfmaschine

In unserem Aufbau wird eine Hartmetallspitze mit vorgegebener Kraft in die Probe gedrückt (Abbildung 6). Die Größe des Eindrucks ist ein Maß für die Härte des Materials (Betrachtung mit Lupe oder im Lichtmikroskop).

Zur Kraftmessung wird eine Feder verwendet. Diese sitzt zwischen der Schraube und dem Stößel mit der Hartmetallspitze. Am Stößel ist eine Skala, die durch die Schraube verläuft. Hiermit kann die Stauchung der Feder abgelesen und die Kraft bestimmt werden.

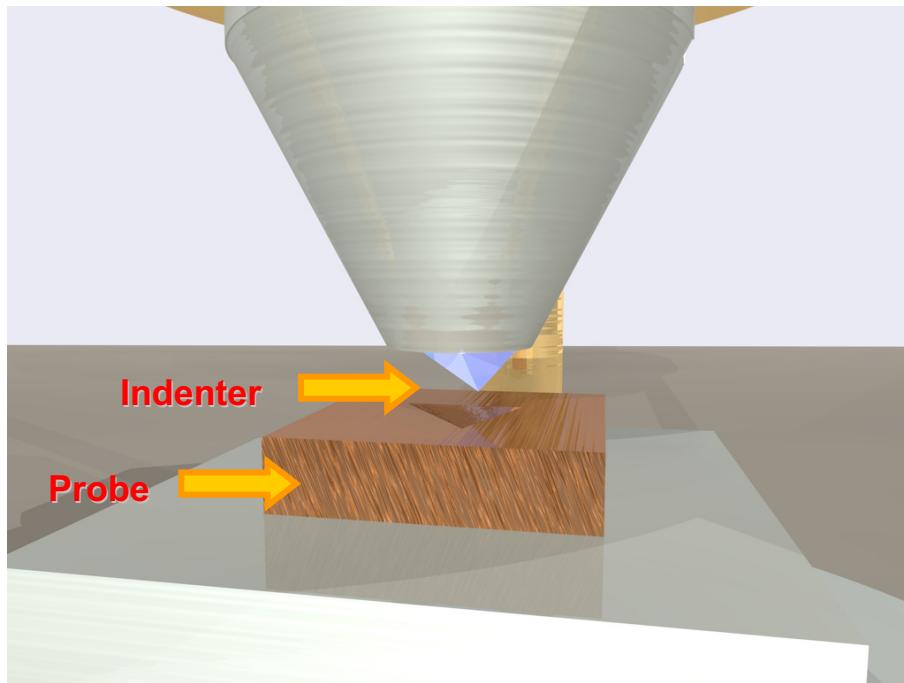


Abbildung 6: Prinzip der Vickers-Härteprüfung

Bevor wir mit der Messung beginnen können, muss die Prüfmaschine wie im Folgenden beschrieben wird zusammengebaut werden. Zunächst wird der Prüfkopf (bestehend aus Spitz und Stößel mit Skala) in den Messtisch eingesetzt, die Feder darüber gelegt und anschließend die Schraube eingedreht.

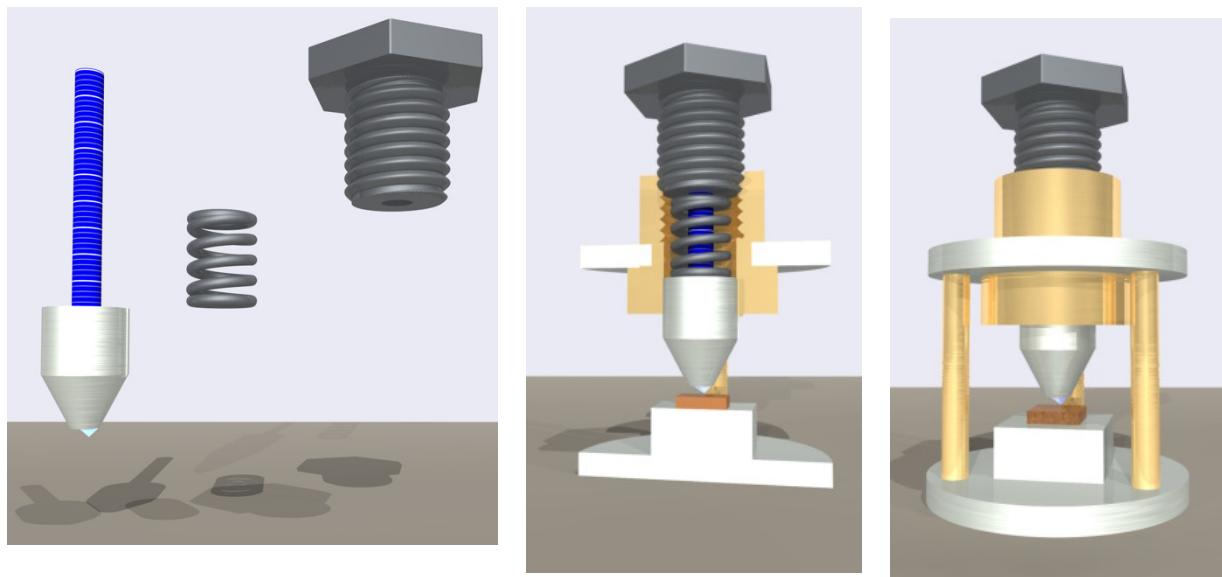


Abbildung 7: Aufbau der Härteprüfmaschine: Stößel mit Skala, Feder und Schraube (links), Schnitt durch den Aufbau (Mitte) und 3D-Ansicht (rechts).

Zur Prüfung legt man nun die zu untersuchende Probe unter die Spitz und dreht die Schraube bis zu einer bestimmten Kraft an. Diese kann an der aus der Schraube austretenden

---

Skala abgelesen werden (Abbildung 8). Für verschiedene Proben muss die Kraft konstant gehalten werden um vergleichbare Resultate zu erhalten.

Die Kraft wird mit Hilfe der Skala abgelesen. Dazu muss die Federkonstante  $k$  der eingesetzten Feder bekannt sein. Es gilt:  $F = k \cdot x$ , wobei  $F$  die Kraft und  $x$  der an der Skala abgelesene Weg sind. Die Skala ist in Millimeter unterteilt. Die Federkonstante der mitgelieferten Stahlfeder beträgt  $1,47 \text{ N mm}^{-1}$ .

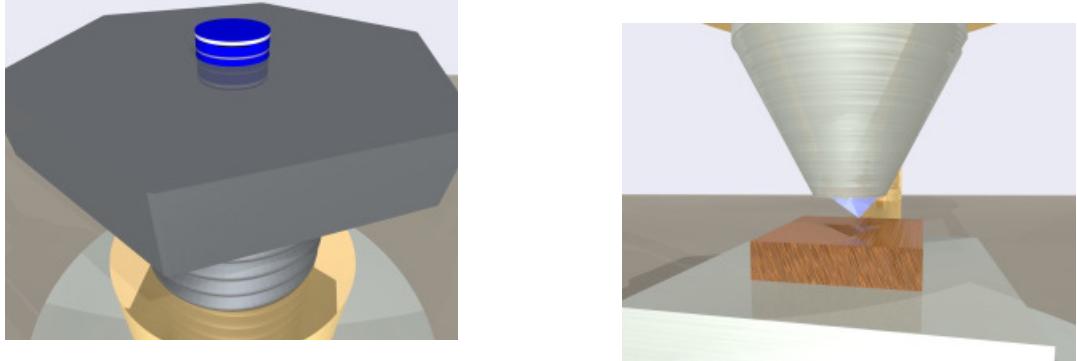


Abbildung 8: Detailansichten: Skala zum Ablesen der Kraft (links) und auf die Probenoberfläche auftreffende Spitze (rechts).

## 2.3 Ergebnisse

Die Eindrücke können mit Hilfe einer Lupe oder eines Auflichtmikroskops betrachtet und vermessen werden.

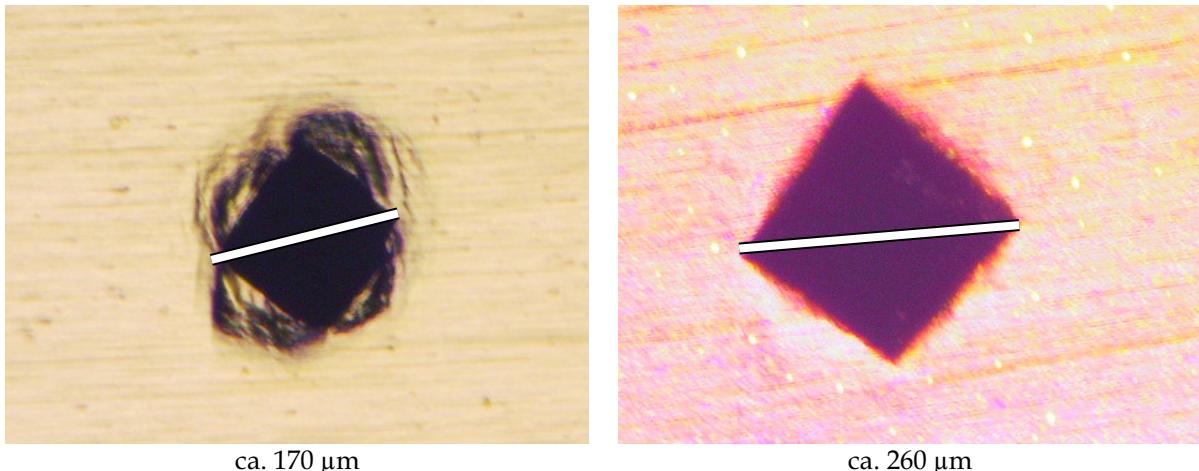


Abbildung 9: Härteeindrücke in der Probe im Ausgangszustand und der geglühten Probe

Vergleichen wir die Größe der Härteeindrücke des Ausgangsmaterials mit der der geglühten Probe (Abbildung 9) stellen wir fest, dass der Härteeindruck der geglühten Probe deutlich größer ist. Das bedeutet die weichgeglühte Probe ist wie der Name schon sagt weicher als das Ausgangsmaterial.

### 3 Drei-Punkt-Biegeversuch

Der Biegeversuch ist eine Methode der zerstörenden Werkstoffprüfung. Er wird vornehmlich bei metallischen, synthetischen (Kunststoff) und keramischen Werkstoffen durchgeführt.

#### 3.1 Grundlagen der Biegeprüfung

Um die Biegeprüfung zu verstehen, müssen zunächst die Werkstoffkennwerte, die ermittelt werden erklärt werden. Diese werden besser anhand eines Zugversuchs verdeutlicht. Bei einem Zugversuch wird an einer Probe gezogen und die benötigte Kraft gegen die Verlängerung aufgetragen. Es leuchtet ein, dass die Kraft, die einer äußeren Verformung entgegen gesetzt wird, auch von der Form der Probe abhängt: Ist die Probe dicker, so ist sie schwerer zu verformen; ist die Probe dagegen länger so braucht man weniger Kraft um sie um den gleichen Weg auseinander zu ziehen. Deswegen teilt man die benötigte Kraft durch die Fläche (Spannung), und die Längenänderung durch die Gesamtlänge der Probe (Dehnung). Ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm enthält träge somit die Spannung gegen die Dehnung auf und ist weit allgemeiner als ein Kraft-Verlängerungs-Diagramm. Aus einem Spannungs-Dehnungs-Diagramm lassen sich dann verschiedene Werkstoffkennwerte ablesen:

- Der *Elastizitätsmodul E* gibt im elastischen Bereich (keine bleibende Verformung) den Widerstand an, den das Material der Verformung entgegensezt. Er wird berechnet aus dem Quotienten aus Spannung durch Dehnung im elastischen Bereich und entspricht daher der Steigung der Geraden.
- Die *elastische Streckgrenze R<sub>p0,2</sub>* ist die maximale Spannung bevor plastische Verformung auftritt.
- Die *Gleichmaßdehnung* ist die Dehnung bis der Werkstoff beginnt sich einzuschnüren.
- Die *Bruchdehnung* ist die maximale Dehnung wenn der Werkstoff bricht.

In technischen Systemen werden Werkstoffe im normalen Betrieb nicht über die elastische Streckgrenze hinaus belastet.

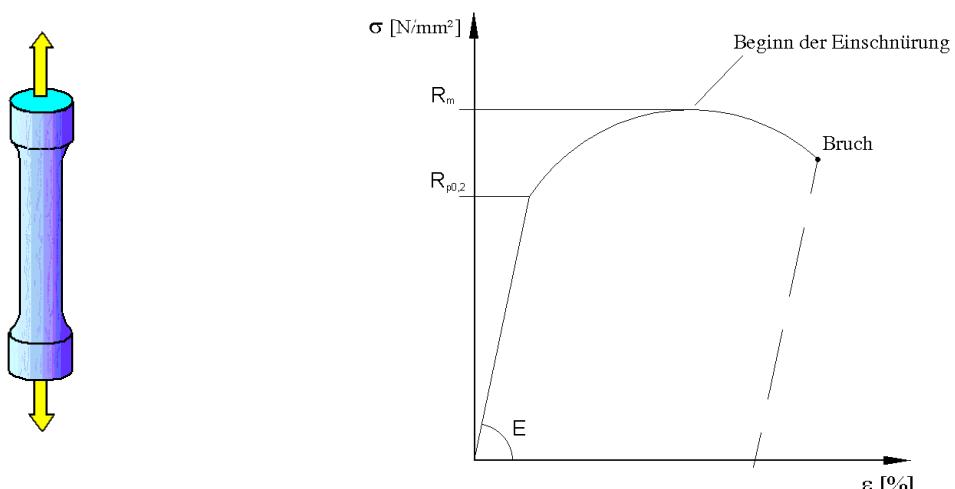


Abbildung 10: Schema eines Zugversuchs und Spannungs-Dehnungs-Diagramm

---

Beim Biegeversuch kommen einige zusätzliche Eigenschaften der Probengeometrie zu tragen. Daher ist eine Umrechnung zwischen Zug- und Biegeversuchen nur im elastischen Bereich eindeutig. Dennoch weisen die Spannungs-Dehnungs-Diagramme (bzw. Kraft-Verlängerungs-Diagramme) einige Ähnlichkeit mit den Kraft-Durchbiegungs-Diagrammen auf.

Es gibt verschiedene Arten von Biegeversuchen, deren Ablauf ähnlich ist und die sich nur durch die Prüfvorrichtung (Auflage) unterscheiden. Beim Biegeversuch wird die Probe durch Druck senkrecht zu ihrer Oberfläche beansprucht. Es wird immer ein Kraft-Durchbiegungs-Diagramm aufgenommen. Man stellt sich also die Frage: Welche Kraft liegt an, wenn die Probe bis zu einer bestimmten Tiefe durchgebogen ist?

Der einfachste Aufbau ist der des 1-Punkt-Biegeversuchs. Die zu prüfende Probe wird an einem Ende eingespannt und auf der freiliegenden Seite mit einem Prüfstempel belastet. Bei 4-Punkt-Biegeversuch liegt die Probe auf zwei auflagen auf, die Kraft wird dazwischen an zwei Punkten, symmetrisch zur Mitte der Probe, aufgebracht.

Die am häufigsten verwendete Form des Biegeversuchs ist der 3-Punkt-Biegeversuch, der auch in dieser Versuchsbeschreibung behandelt wird. Die zu prüfende Probe wird auf 2 Auflagen positioniert und in der Mitte mit nur einem Prüfstempel belastet. Die Durchbiegung wird in der Mitte aufgenommen, dort wo die größte Absenkung der Probe erwartet wird.

### 3.2 Aufbau der Biegeprüfmaschine

Die Prüfmaschine wird analog zur Härtemessung aufgebaut, allerdings muss sie sich nun in der Nähe einer Wand oder eines Schirmes befinden. Am besten befindet sich auf dem Schirm eine Skala (z.B. Millimeterpapier). Natürlich wird der Prüfkopf für die Biegung umgerüstet und der Biegetisch wird als Auflage für die Proben verwendet.

Die Probe wird auf die zwei Stege gelegt. Wird die Schraube, wie bei der Härteprüfung, angezogen, so wird eine Biegekraft auf die Probe ausgeübt. Diese Kraft kann an der Skala abgelesen werden. Die Durchbiegung kann mit Hilfe eines gelagerten Spiegels abgelesen werden. Dieser wird von einem LASER bestrahlt. Der reflektierte Strahl ist dann an der Wand des Klassenzimmers sichtbar. Aus der Höhe kann auf die Drehung des Spiegels und somit auf die Durchbiegung der Probe geschlossen werden. Wird die Kraft gegen die Durchbiegung aufgetragen, erhält man eine Biegekurve.

Die Kraft wird analog zum Härteversuch bestimmt. Die Durchbiegung wird aus dem Weg des Laserpunktes an der Wand berechnet. aus geometrischen Überlegungen ergibt sich folgende Formel:

$$y = l + \sqrt{L^2 + l^2} \cdot \sin\left(\left(\alpha_0 - \delta\right) + \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{H}{D}\right)\right)$$
$$\delta = \arctan\left(\frac{l}{L}\right) \quad \alpha_0 = -\frac{1}{2} \arctan\left(\frac{H_0}{D}\right)$$

Dabei ist  $y$  die Durchbiegung,  $l$  die Länge des Messdorns,  $L$  die Länge des Messarms,  $D$  der Abstand Zwischen Spiegel und Wand und  $H$  die Höhe des Laserpunktes gemessen von der

Horizontalen (siehe Abbildung 13). Da bis auf  $H$  alle Größen der Gleichung konstant sind kann direkt die Durchbiegung errechnet werden.

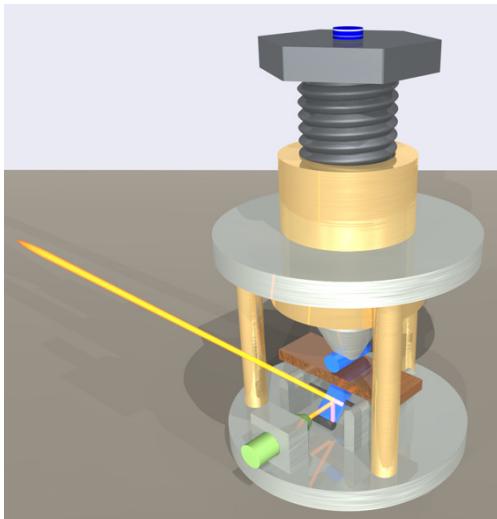


Abbildung 11: Aufbau des Biegeversuchs

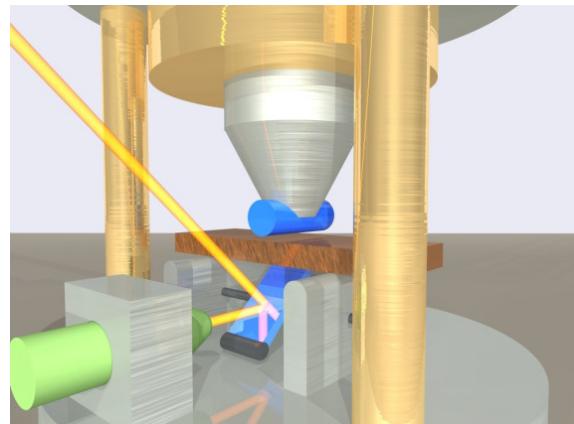


Abbildung 12: Vergrößerung Probe

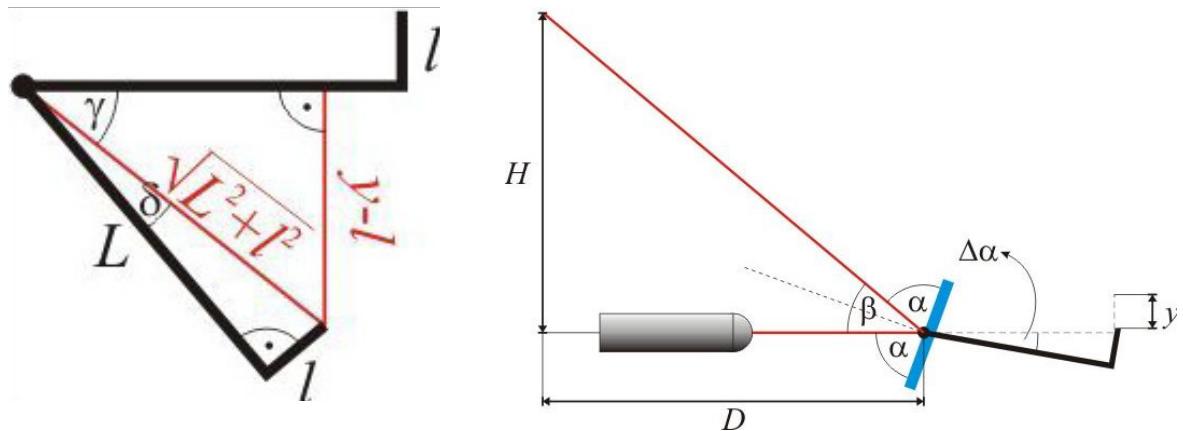


Abbildung 13: Geometrie zur Ermittlung der Durchbiegung

### 3.3 Versuche und Ergebnisse

Wie zuvor werden je eine gewalzte und eine weichgeglühte Kupferprobe mit Hilfe des Biegeversuchs untersucht. Die Proben werden auf die Auflagen gelegt. Dann wird mit Hilfe der Schraube die Kraft auf die Probe in kleinen Schritten erhöht. Je zu jedem Kraftwert, wird die Höhe  $H$  des Laserstrahls notiert. Die aufgenommenen Werte für den Weg des Laserpunktes an der Wand müssen dann noch in die entsprechende Durchbiegung umgerechnet werden (siehe oben).

Aus der so erhaltenen Wertetabelle können die Kraft-Durchbiegungs-Diagramme rekonstruiert werden. Entweder man zeichnet die Punkte mit per Hand auf Millimeterpapier oder man verwendet eine Software (z.B. Microsoft EXCEL oder OpenOffice Calc).



Abbildung 14: Fotos der gebogenen Proben

Auf den Fotos der geprüften Proben (Abbildung 14) kann man erkennen, dass beide Proben bis zur maximalen Durchbiegung belastet wurden. Dazu waren bei den Proben unterschiedliche Kräfte erforderlich (Abbildung 15). Wie zu erwarten war musste bei der weichgeglühten Probe eine geringere Kraft aufgebracht werden. Ein weiterer Unterschied ist bei der Betrachtung der Biegeradien zu sehen. Während die harte Probe einen schmalen Knick zeigt, ist die weiche Probe stark gerundet. Dies lässt sich ebenfalls über die oben beschriebene Theorie der Verfestigung erklären. Die weiche Probe wird im ersten Biegestadium exakt in der Mitte gebogen. Durch die Verschiebung der Atome verfestigt sie aber dort stark. Dadurch ist es günstiger die weitere Verformung an Orten weiter außerhalb der Mitte durchzuführen wodurch diese wiederum verfestigen, und die Verformung verlagert sich wiederum weiter nach außen. Dahingegen ist die gewalzte Probe schon vorher verfestigt und dadurch sind die Unterschiede zwischen der Mitte und den umliegenden Bereichen geringer und die Biegung findet lokal in der Mitte statt.

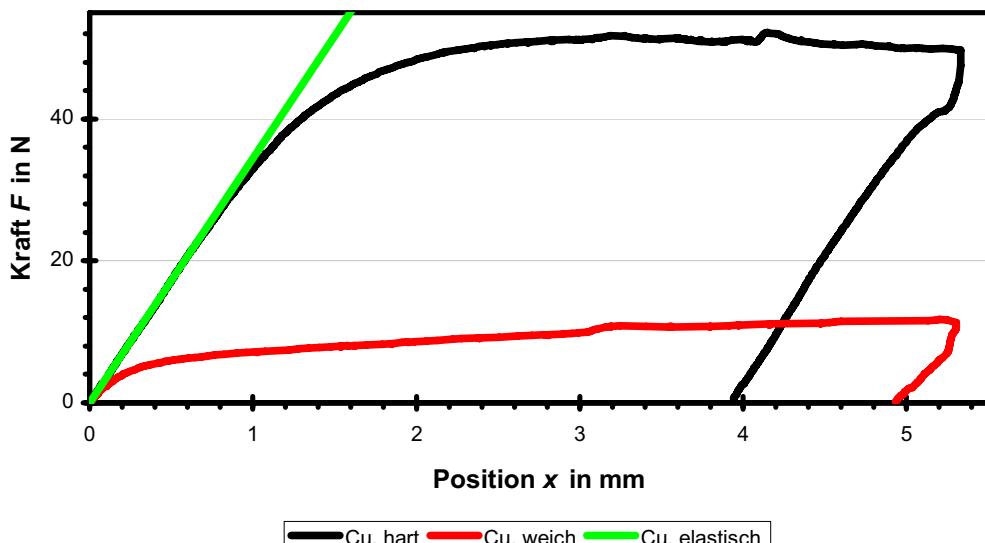


Abbildung 15: Kraft-Durchbiegungs-Diagramm

---

## 4 Zusammenfassung

Die beiden hier durchgeführten Versuche vermitteln einen Eindruck, wie Materialparameter, z. B. die Härte oder auch der Elastizitätsmodul, aus experimentellen Daten ermittelt werden. Die rohen aufgenommenen Daten (Diagonalen des Härteeindrucks, Höhe des Laserpunktes) werden mit Hilfe von Formeln umgerechnet. Im Fall der Biegeprüfung werden die ungerechneten Daten in ein Diagramm eingetragen um die Werte anschaulich darzustellen.

Die Härte der Werkstoffe ist besonders relevant wenn der Verschleiß von Werkstücken und Werkzeugen betrachtet wird. Die mechanischen Eigenschaften wie der Elastizitätsmodul sind für alle Konstruktionsprobleme wichtig. Werkstoffe mit hohen Elastizitätsmodulen können bei kleineren Querschnitten die gleiche Last tragen. Insbesondere beim Leichtbau (Luft- und Raumfahrttechnik, Automobilindustrie) sind diese Eigenschaften zunehmend wichtig. Gleichzeitig benötigt man einen genügend großen plastischen Bereich, um ein plötzliches Versagen der Werkstoffe zu verhindern. Diese Beispiele zeigen deutlich die Bedeutung der Ermittlung von Materialkonstanten in der Industrie.

Darüber hinaus wurden Proben untersucht die, obwohl sie die gleiche chemische Zusammensetzung aufwiesen, unterschiedliche mechanische Eigenschaften zeigten. Die wesentliche Erkenntnis daraus ist, dass Materialeigenschaften nicht nur von der chemischen Zusammensetzung sondern von der Anordnung der Atome und in besonderer Weise von der Mikrostruktur der Werkstoffe abhängen.