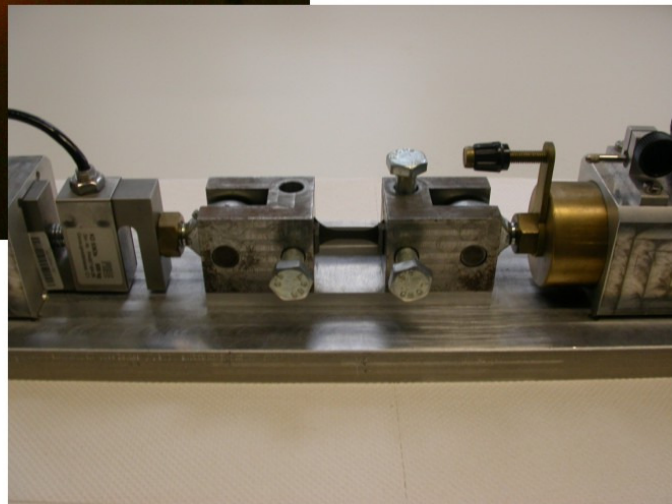
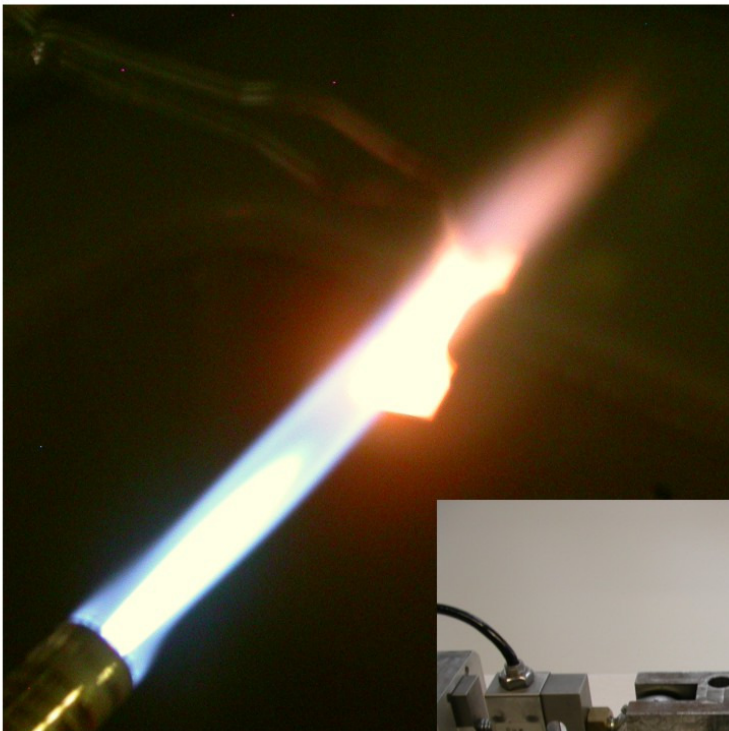




Der Zugversuch und das Härten von Stahl Von der Mikrostruktur zur technischen Anwendung



Erstellt am Institut für Werkstoffwissenschaft und Methodik der Universität des Saarlandes i. A. Prof. H. Vehoff,
erstellt von Wolfgang Schäfer, Konstruktion und Planung: Stefan Schmitz, Peter Limbach, Wolfgang Schäfer
Kontakt: w.schaefer@matsci.uni-sb.de

Mechanische Spannung und Dehnung als Kenngrößen für die Technik

Wenn Ingenieure ein Auto, Flugzeug, eine Brücke oder generell Fahrzeuge, Maschinen oder Bauwerke konstruieren wollen, müssen sie die Sicherheit der Konstruktion gewährleisten können. Fatale Ausfälle wie der Achsbruch eines Autos bei voller Fahrt, das Abreißen einer Tragfläche eines Flugzeugs oder das Zusammenstürzen einer Brücke müssen nach bestem Wissen verhindert werden. Aus diesem Grund muss man die Belastungen, der die einzelnen Komponenten einer Konstruktion ausgesetzt sind, bereits in der Planungsphase möglichst genau berechnen. Gleichzeitig muss man entscheiden, mit welchen Werkstoffen die Komponenten konstruiert werden und welche Belastungen diese Werkstoffe ertragen können, ohne zu versagen. Ein einfaches Beispiel ist ein Fachwerkgerüst aus Aluminium oder Stahl, das z.B. bei Musikveranstaltungen benutzt wird, um die Lampen für die Bühnenbeleuchtung zu tragen. Die einzelnen Stäbe des Fachwerks erfahren je nach ihrer Lage Zug- bzw. Druckkräfte. Diese Kräfte dürfen die Festigkeit des Materials nicht überschreiten, damit das Fachwerk nicht zusammenstürzt und die Lampen mit ihrem vollen Gewicht auf die Bühne fallen.

Bevor wir uns der Frage widmen, wie man die Festigkeit eines Materials beurteilt, muss zunächst geklärt werden wie man die Belastung einer Komponente messen bzw. berechnen kann.

Nehmen wir als einfaches Beispiel einen Stab mit Querschnitt A, wie er z. B. in einem Fachwerk vorkommen kann (Abbildung 1). Der Stab ist an der Unterseite fest eingespannt, am Oberen Ende wirkt eine Kraft F in Richtung der Stabachse. Es ist einleuchtend, dass ein dicker Stab eine größere Last ertragen kann als ein dünner Stab aus gleichem Material. Aus diesem Grund definiert man die **mechanische Spannung** (kurz: **Spannung**) als Kraft pro Querschnitt:

$$\text{Spannung} := \sigma = \frac{F}{A}, \quad [\sigma] = \frac{N}{\text{mm}^2}$$

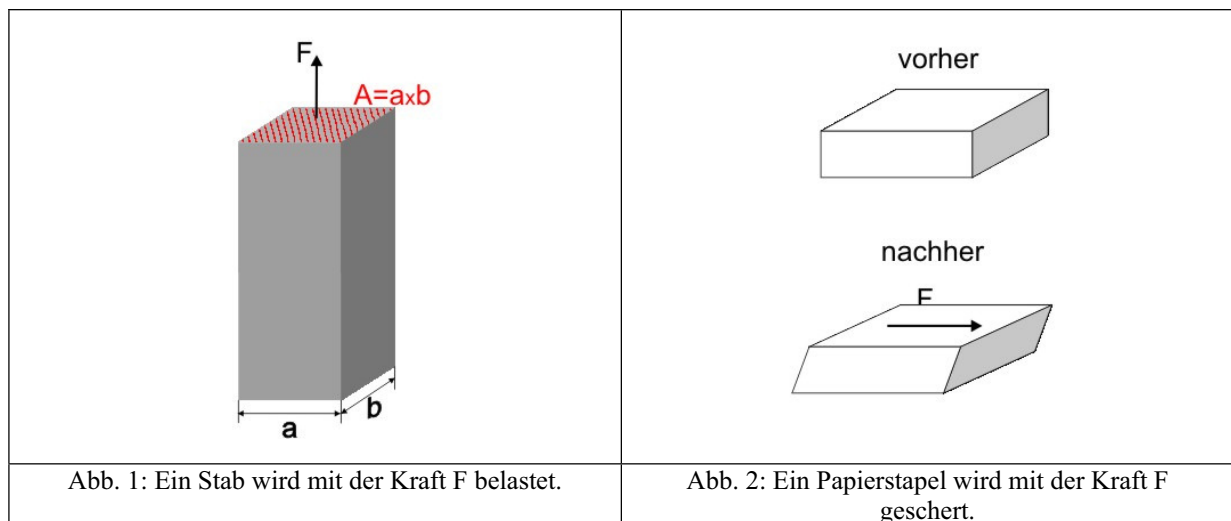
Die Spannung beschreibt also die Belastung des Materials unabhängig von der Geometrie. Man kann sich die Spannung vorstellen als eine Belastung, die in jedem Punkt des Körpers in Richtung der Stabachse wirkt.

Eine mechanische Spannung bewirkt bei Metallen eine Verlängerung des Materials, bei nicht zu großen Spannungen ist die Längenänderung in Belastungsrichtung proportional zur wirkenden Spannung. Dieser Zusammenhang ist als **Hookesches Gesetz** bekannt. Dazu ein Beispiel: Wenn wir bei unserem Stab die Anfangslänge l_0 nennen und die Länge der Probe bei einer Spannung σ als l bezeichnen, kann man das Hookesche Gesetz wie folgt schreiben:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad [E] = \frac{N}{\text{mm}^2}, \quad [\varepsilon] = \%$$

Die Größe E nennt man den **Elastizitätsmodul**, er ist abhängig vom betrachteten Werkstoff. ε bezeichnet die Verlängerung der Probe pro Ausgangslänge, man nennt diese Größe die **Dehnung**.

Neben der reinen Zug oder Druckspannung kann man noch eine weitere Art von Spannung definieren, die so genannte **Schubspannung**. Die Schubspannung kann man sich modellhaft an einem dicken Stapel Papier verdeutlichen (Abbildung 2). Legt man auf der Oberseite des Papierstapels eine Kraft F an (die Unterseite wird durch Reibung auf dem Tisch festgehalten), wird der Stapel geschert. Teilt man die Kraft F durch die Fläche, auf der sie angreift, erhält man wie oben eine Spannung, die man Schubspannung nennt.



Solche Schubspannungen treten auch in unserem oben besprochenen Stab in bestimmten Richtungen auf, wie folgendes Beispiel zeigt:

- Der Zugversuch und das Härten von Stahl -
www.natworking-advanced-materials.de

Wir stellen uns vor, der Stab enthält eine durchgehende Schweißnaht unter einem Winkel α , wie in Abbildung 3. Oft stellt eine Schweißnaht eine Schwachstelle in einer Konstruktion dar, weil sie meist kleine Poren oder Risse enthält, die die Festigkeit mindern. Deshalb muss man die Spannungen die eine Schweißnaht trägt kennen. Dazu können wir in unserem Beispiel die Kraft, die an der Schweißnaht angreift, in zwei Kräfte senkrecht und parallel zur Naht zerlegen (Abbildung 4). Aus dem Kräfteck kann man die beiden Kräfte bestimmen:

$$F_N = F \cos(\alpha)$$

$$F_S = F \sin(\alpha)$$

Teilt man die beiden Kräfte jeweils durch die Fläche B der Schweißnaht, erhält man zwei Spannungen: eine Zugspannung

$$\sigma = \frac{F_N}{B} = \frac{F \cos(\alpha)}{B}$$

und eine Schubspannung

$$\tau = \frac{F_S}{B} = \frac{F \sin(\alpha)}{B}$$

Die Fläche der Schweißnaht ist abhängig vom Winkel α . Wie man in der Abbildung sehen kann, gilt:

$$B = \frac{A}{\cos(\alpha)}$$

Setzen wir diesen Ausdruck für B in die Formel für unsere Schubspannung ein, erhalten wir:

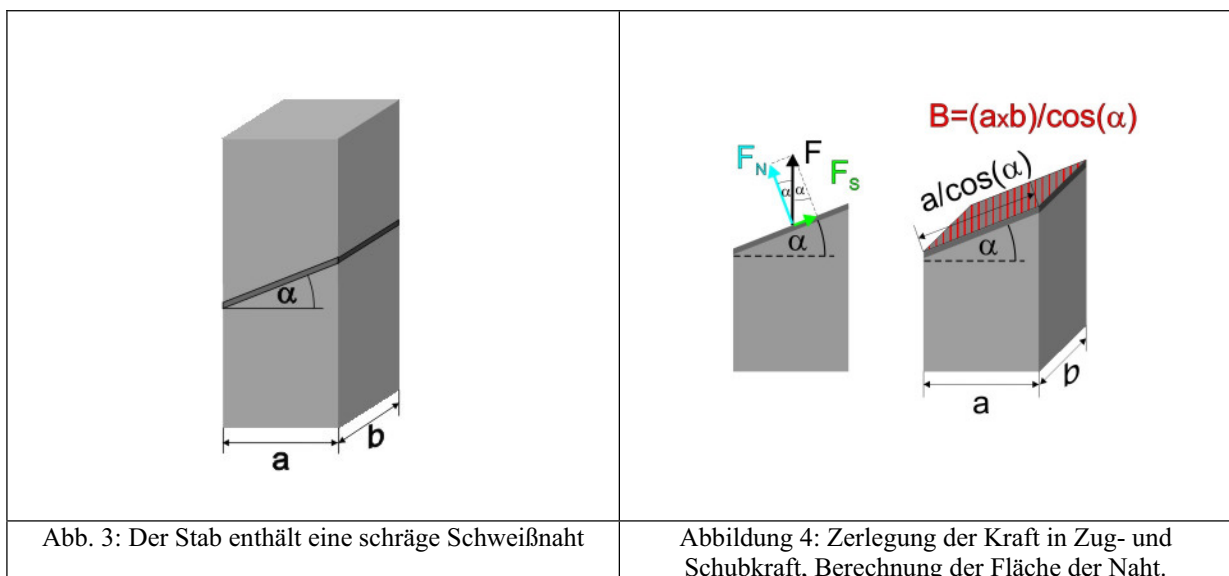
$$\tau = \frac{F}{A} \sin(\alpha) \cos(\alpha).$$

Die Höhe der Schubspannung ist abhängig vom Winkel. Die maximale Schubspannung wird bei einem Winkel von 45° erreicht.

Je nachdem, welche Ebene wir im Stab betrachten, kann die äußere Last also nicht nur Zug- sondern auch Schubspannungen verursache. Wie wir später sehen werden, spielt die Schubspannung bei hohen äußeren Lasten eine wichtige Rolle.

Nachdem wir jetzt mit den Spannungen ein Kriterium gefunden haben, mit dem wir die Belastung von Bauteilen beurteilen können, kommen wir zu unserer Frage nach der Festigkeit der Materialien zurück:

Wie kann man also die Festigkeit eines Materials beurteilen? Der einfachste und wichtigste Versuch um diese Frage in der Praxis zu klären ist der so genannte Zugversuch.

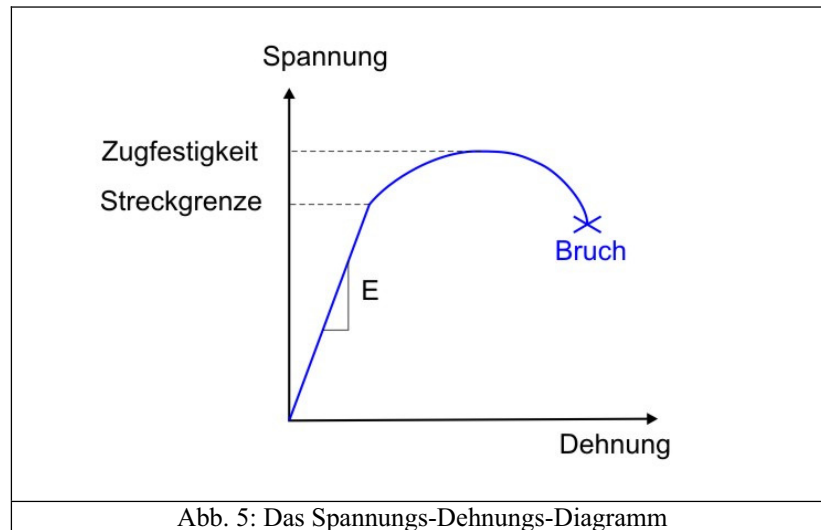


Der Zugversuch

Der Versuch besteht darin, eine Probe durch eine Zugbeanspruchung bis zum Bruch zu dehnen, um mechanische Kenngrößen zu bestimmen.

Dazu wird eine Probe aus dem zu testenden Werkstoff wie in dem zu dieser Anleitung gehörenden Versuch in eine Maschine eingespannt. Diese Maschine muss in der Lage sein, die Probe bis zum Bruch zu dehnen, während Kraft und Verlängerung der Probe gemessen werden. Aus den gemessenen Werten kann man Spannung und Dehnung der Probe berechnen.

Trägt man die Spannung in Abhängigkeit der Dehnung in einem Diagramm auf, sieht das bei einem metallischen Werkstoff, z. B. einem typischen Baustahl aus wie in folgender Abbildung:



Es fällt auf, dass die Spannung zur Dehnung nur bei kleinen Dehnungen proportional ist, dort beschreibt eine Gerade mit der Steigung E (Elastizitätsmodul) den Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung. Bei großen Dehnungen gilt das Hooksche Gesetz nicht mehr. Die Spannung, ab der dieses Gesetz nicht mehr gilt nennt man die **Streckgrenze**. Wenn man eine Metallprobe oberhalb der Streckgrenze belastet und danach die Last wegnimmt, bleibt eine permanente Dehnung zurück, d. h. die Probe hat sich verlängert. Man nennt dieses Phänomen **plastische Verformung**. Dieses Phänomen kann man auch beobachten, wenn man eine Büroklammer verbiegt. Wenn man nur leicht an der Klammer zupft, federt sie beim loslassen wieder zurück. Biegt man die Klammer hingegen um einen großen Winkel, dann ist sie dauerhaft verformt. Die Streckgrenze wird für viele Bauteile als Obergrenze der Belastbarkeit festgelegt, weil sich bei einer Überschreitung die Form des Teils verändert. In Getrieben oder Motoren zum Beispiel, wo nur genau eingehaltene Bauteilformen die optimale Funktion gewährleisten können, dürfen sich die Geometrien der Bauteile im Betrieb nicht verändern.

Im Diagramm fällt ein weiterer Punkt auf, die so genannte **Zugfestigkeit**. Dehnt man die Probe über die Zugfestigkeit hinaus, wird die Spannung bei zunehmender Dehnung kleiner, bis die Probe bricht. Die Zugfestigkeit beschreibt somit die maximale Spannung, die der Werkstoff ertragen kann.

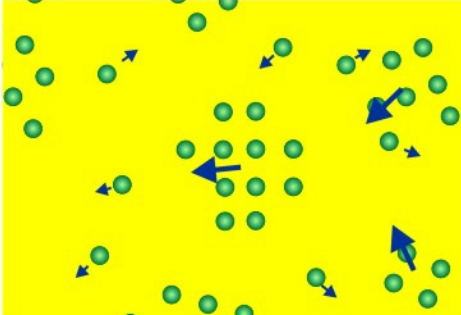
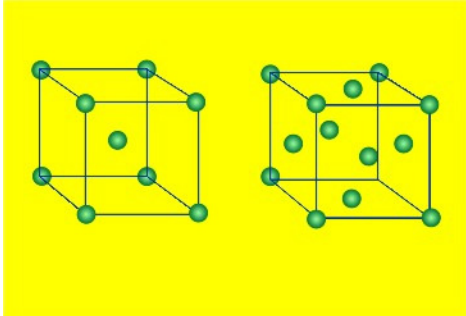
Mit dem Zugversuch kann man also die Streckgrenze und die Zugfestigkeit von metallischen Werkstoffen ermitteln. Was aber steckt hinter diesen Kenngrößen? Warum verhalten sich Metalle oberhalb der Streckgrenze nicht mehr rein elastisch und wie kann die Spannung bei Erreichen der Zugfestigkeit kleiner werden, wenn man die Dehnung weiter erhöht?

Um diese Fragen zu beantworten, muss man die innere Struktur der Metalle verstehen, das, was zwischen den einzelnen Metallatomen und dem fertigen Bauteil liegt: die Mikrostruktur.

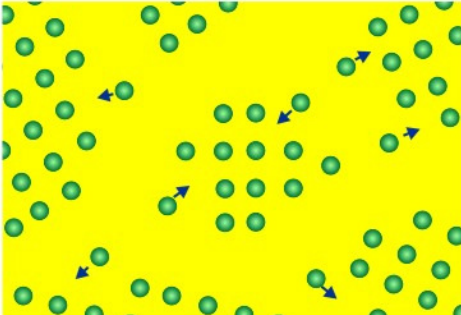
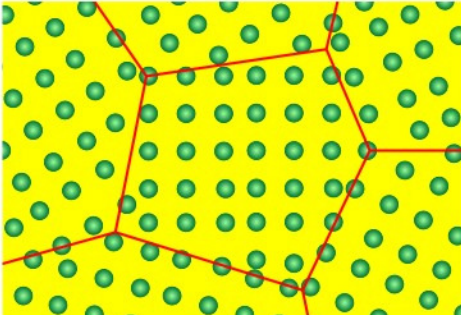
Die Mikrostruktur der Metalle

Um die Mikrostruktur der Metalle zu verstehen, betrachten wir die Erstarrung eines Metalls aus der Schmelze. In der Schmelze „fliegen“ die Atome des Metalls ungeordnet durcheinander. Sie bilden dabei oft kleine Keime, d. h. Einheiten aus mehreren aneinander gebundenen Atomen, wie in Abbildung 6 gezeigt. Die Atome binden sich dabei nicht beliebig aneinander, sondern in einer regelmäßigen Anordnung die man auch **Kristallgitter** oder einfach nur Gitter nennt. Der Aufbau des Gitters ist abhängig von der Art des Metalls, es gibt verschiedene Typen, von denen zwei in Abbildung 7 gezeigt sind.

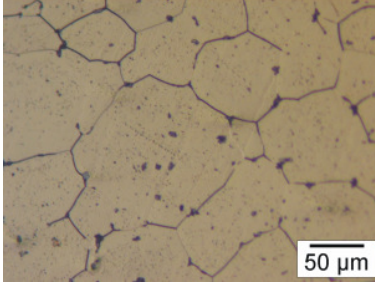
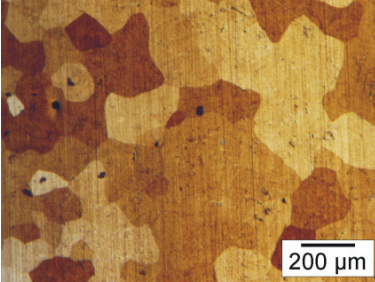
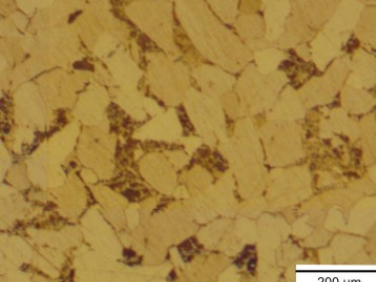
Man kann sich das Gitter aus einzelnen **Elementarzellen** aufgebaut denken, wie sie in der Abbildung zu sehen sind. In den Elementarzellen kann man Ebenen Definieren, z. B. die Würfelflächen oder die Diagonalen. Solche Ebenen nennt man **Netzebenen**.

	
<p>Abb. 6: Keime und Atome bewegen sich ungeordnet in der Schmelze.</p>	<p>Abb. 7, links: Raumzentriertes Gitter mit Atom in der Mitte der Zelle Abb. 7, rechts: Flächenzentriertes Gitter mit Atomen auf den Seitenmitten.</p>

Nimmt die Temperatur der Metallschmelze ab, beginnen die frei fliegenden Atome und die kleinen Keime, sich an die großen Keime zu binden, wobei sie sich so anordnen, dass sie dem Gitter der großen Keime folgen. Die großen Keime wachsen beim Erstarren des Metalls so lange, bis sie sich berühren und aneinander binden. Im Erstarren Zustand werden die ehemaligen Keime als **Körner** bezeichnet. In dem Bereich, wo sich zwei Körner treffen, ändert sich die Orientierung des Kristallgitters entsprechend der Orientierungen, die die ehemaligen Keime vor dem Erstarren hatten. Den Bereich, in dem sich die Orientierung ändert, nennt man **Korngrenze**.

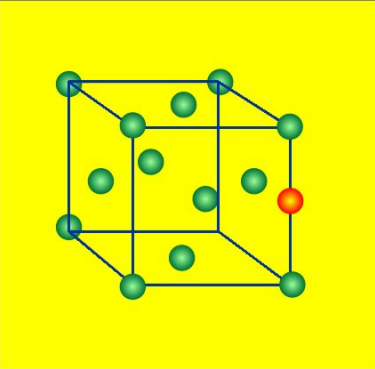
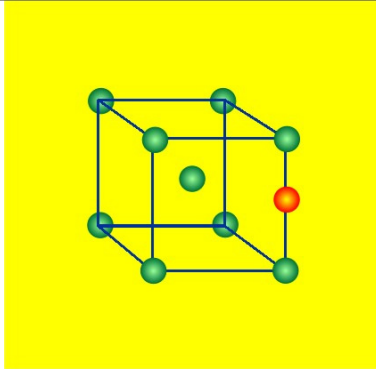
	
<p>Abb. 8: Große Keime wachsen beim Erstarren der Schmelze.</p>	<p>Abb. 9: Im Erstarren Metall sind die Körner durch Korngrenzen getrennt.</p>

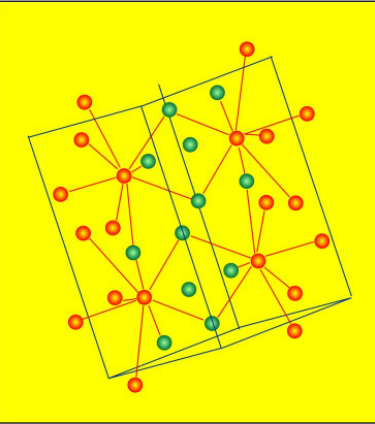
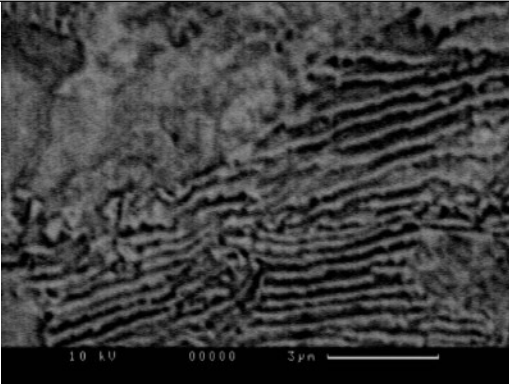
Größe und Form der Körner eines Metalls sind unter anderem stark abhängig von der Erstarrungsgeschwindigkeit, von der Reinheit des Metalls und bei Mischungen von Metallen (= **Legierungen**) von dem Mengenverhältnis der Komponenten. Man kann die Körner im Mikroskop sichtbar machen, indem man eine glatte Oberfläche des Metalls poliert und mit einer geeigneten Säure ätzt (z.B. Salpetersäure mit 98 % Ethanol für Stahl). Die Korngrenzen, wo das Gitter sich ändert werden von der Säure stärker angegriffen und sind im Mikroskop sichtbar. Einige typische Bilder der Kornstruktur von Metallen zeigen die Abbildungen 10a-c.

		
<p>Abb. 10a: Aluminiumlegierung</p>	<p>Abb. 10b: Nickellegierung</p>	<p>Abb. 10c: Baustahl</p>

Bei Legierungen und insbesondere bei Stahl kann es zu dem Vorkommen, dass mehrere Gittertypen auftreten. Das hängt unter anderem damit zusammen, dass die Löslichkeit der Elemente vom Gittertyp abhängt. Dies lässt sich am Beispiel von Stahl demonstrieren: Stahl besteht im Wesentlichen aus Eisen mit einem geringen Anteil an Kohlenstoff (0,1% – 0,8% des Gewichts bei vielen Baustählen). Nach der Erstarrung des Stahls bildet sich zunächst ein Gittertyp, der viel Kohlenstoff lösen kann, der so genannte **Austenit** (Abbildung 11). Nach dem Erstarren ist dieser Gittertyp unter etwa 900 °C nicht mehr stabil und es bildet sich der so genannte **Ferrit** (Abbildung 12). Der Ferrit kann weniger Kohlenstoff lösen als der Austenit. Der überschüssige Kohlenstoff konzentriert sich an den Korngrenzen und bildet dort mit dem Eisen des Ferrits eine neue Phase, den so genannten **Zementit**. Der Zementit ist hart und spröde und hat ein sehr kompliziertes Gitter (Abbildung 13). Er bildet sich in feinen Lamellen, die man zusammen mit dem umgebenden Ferrit auch als **Perlit** bezeichnet (Abbildung 14).

Die Körner und Phasen bezeichnet man zusammen als **Gefüge** oder **Mikrostruktur**.

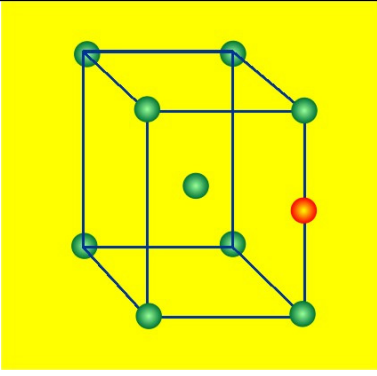
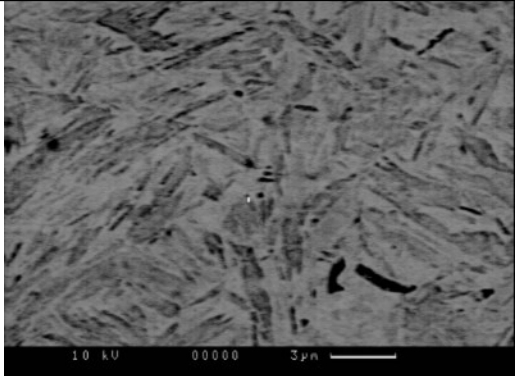
	
<p>Abb. 11: der Austenit hat ein flächenzentriertes Gitter, der Kohlenstoff hat viel Platz auf den Würfelkanten.</p>	<p>Abb. 12: der Ferrit ist raumzentriert und bietet weniger Platz für Kohlenstoffatome.</p>

	
<p>Abb. 13: Der Zementit hat ein kompliziertes Gitter.</p>	<p>Abb. 14: Lamellenförmiger Perlit, elektronenmikroskopische Aufnahme.</p>

Ein besonderes Merkmal des Stahls ist die starke Abhängigkeit des Gefüges und der Phasen von der Abkühlgeschwindigkeit. Das bekannteste Beispiel für solche Änderungen des Gefüges ist das Härten von Stahl, das Gegenstand des vorliegenden Versuches ist:

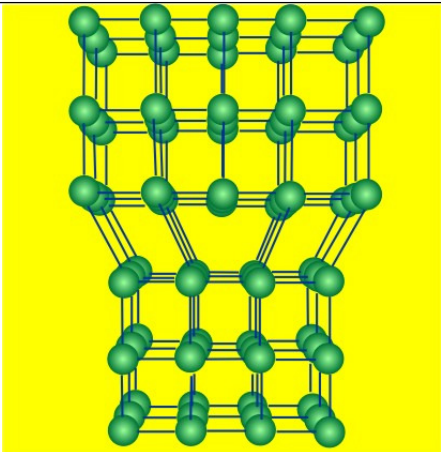
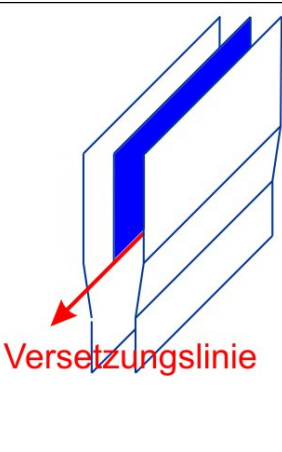
Beim Härten wird der Stahl über 900°C erwärmt, damit sich das Gefüge noch mal in Austenit umwandelt. Wenn man den Stahl danach schlagartig abkühlt, hat der Kohlenstoff keine Zeit, durch das Gitter zu wandern, sich zu konzentrieren und Zementit zu bilden. Stattdessen bleibt er in dem entstehenden Ferrit gelöst und verzerrt diesen Gittertyp, der ja eigentlich nur wenig Kohlenstoff aufnehmen kann. Die Verzerrung ist so stark, dass sich das Gitter ändert (Abbildung 15), man erhält also eine neue Phase, den **Martensit**. Das Gitter des Martensits steht durch die Verzerrungen unter starker mechanischer Spannung. Die Bereiche des Gefüges, die in Martensit umgewandelt sind, bilden Platten- und Nadelförmige Strukturen, die im Mikroskop nach dem Ätzen sichtbar sind (Abbildung 16).

Nachdem wir uns mit der Mikrostruktur von Metallen, insbesondere von Stahl beschäftigt haben, können wir den Geheimnissen von plastischer Verformung, Streckgrenze und Zugfestigkeit weiter auf den Grund gehen.

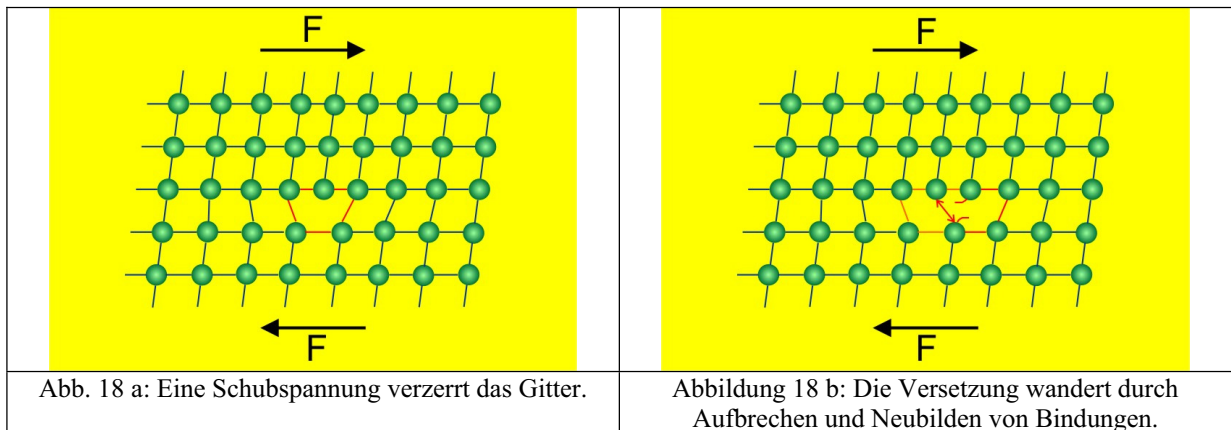
	
<p>Abb. 15: Das Gitter des Ferrits wird durch Kohlenstoff zu Martensit verzerrt.</p>	<p>Abb. 16: Der Martensit erscheint im Elektronenmikroskop in Form von Nadeln und Platten.</p>

Plastische Verformung

Was passiert, wenn ein metallischer Werkstoff oberhalb der Streckgrenze belastet wird? Diese Frage konnte Mitte des letzten Jahrhunderts durch Analyse der Vorgänge innerhalb der Mikrostruktur von Metallen geklärt werden. Verantwortlich für die Änderung im Spannungs-Dehnungs Verhalten sind eine bestimmte Klasse von Fehlern in der Kristallstruktur, die so genannten Versetzungen. Diese Fehler liegen in jedem metallischen Werkstoff vor, sie entstehen unter anderem bei der Erstarrung aus der Schmelze und bei der Verformung oberhalb der Streckgrenze. Ein typischer Vertreter dieser Versetzungen ist die Stufenversetzung, Abbildung 17a, b. Eine Stufenversetzung kann man sich vorstellen als eine innerhalb der Kristallstruktur endende Netzebene. Die Linie, entlang derer diese Ebene endet, nennt man die Versetzungslinie. Die Atome in unmittelbarer Umgebung der Versetzungslinie bilden den Versetzungskern. Das Gitter ist in diesem Bereich stark verzerrt, die Bindungen zwischen den Atomen sind schwächer. Entlang der Versetzungslinie ist die Ordnung und damit die atomare Bindung des Kristallgitters gestört. Durch die eingeschobene Netzebene steht das Atomgitter oberhalb der Versetzungslinie unter Druckspannung, unterhalb der Versetzungslinie herrscht hingegen Zugspannung, denn das Gitter muss sich aufweiten um den Zusammenhalt mit dem oberen Bereich zu wahren.

	
<p>Abb. 17 a: Bei der Stufenversetzung ist eine zusätzliche Halbebene im Gitter vorhanden.</p>	<p>Abb. 17 b: Schematische Darstellung, die Versetzungslinie zeigt die Grenze der Halbebene.</p>

Die Rolle der Versetzungen bei der plastischen Verformung oberhalb der Streckgrenze lässt sich verdeutlichen, wenn man ein Kristallgitter mit Stufenversetzung unter Schubspannung setzt. Durch die Spannung wird das Gitter verzerrt, der Versetzungskern wird unsymmetrisch. Ist die Schubspannung groß genug, wechselt eine der schwachen Bindungen im Versetzungskern (rechts) zur eingeschobenen Netzebene (Abbildung 18 a, b). Durch Wiederholung dieses Vorgangs entlang der Versetzungslinie wandert die Versetzung quasi nach rechts. Dieser Vorgang kann sich beliebig oft wiederholen.



Trifft die Versetzung bei ihrer Bewegung auf eine freie Oberfläche, verschwindet sie und bildet an der Oberfläche eine Stufe. Wenn viele Versetzungen im selben Bereich das Kristallgitter verlassen, bilden sich auf diese Weise Gleitstufen, die man im Mikroskop gut erkennen kann (Abbildung 20). Mit der Bildung der Gleitstufen wird also eine Scherung des Kristallgitters erreicht, die bei Wegnahme der Schubspannung nicht zurückgeht; die Gleitstufe bleibt auch ohne äußere Kraft bestehen.

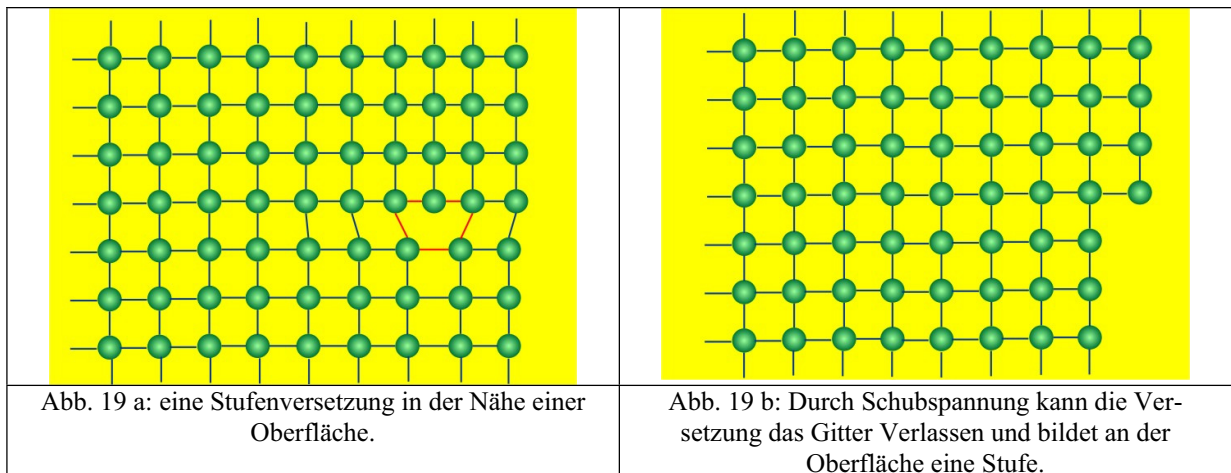


Abb. 20: Gleitstufen an der Oberfläche einer Zugprobe aus Nickel.

Erinnern wir uns an das Wirkungs-dreieck der Spannungen, können wir die auf die Versetzungen in den einzelnen Körnern wirkenden Spannungen beim Zugversuch in Normal- und Schubspannungen zerlegen. Die Streckgrenze ist erreicht, wenn auf genügend Versetzungen in den Körnern eine so große Schubspannung wirkt, dass sie sich bewegen können. Ab Erreichen der Streckgrenze können bei nur geringer Erhöhung der Kraft viele Versetzungen Gleitstufen bilden und damit eine starke Verformung auslösen, der Verlauf der Spannungs-Dehnungs Kurve wird flacher und folgt nicht mehr dem Hookschen Gesetz. Mit zunehmender Kraft können

immer mehr Versetzungen Gleitstufen bilden, schließlich beginnt sich die Zugprobe beim Erreichen der Zugfestigkeit einzuschnüren. Dadurch nimmt der Querschnitt etwa in der Mitte der Probe ab. In der Spannungs-Dehnungs Kurve nimmt die Kraft ab. Weil der Querschnitt in der Probe sich beim Einschnüren jedoch lokal verringert, wirkt tatsächlich noch eine hohe Spannung, d. h. die Spannung steigt weiter, auch wenn man beim Versuch eine Abnahme der Kraft beobachtet. Ist die Einschnürung der Probe so weit fortgeschritten, dass der verbleibende Querschnitt die Last nicht mehr tragen kann, bricht die Probe. Betrachtet man die gebrochene Probe nach dem Versuch, kann man im Bereich des Bruches deutlich die Einschnürung erkennen.

Die Besonderheiten des gehärteten Stahls

Die Zugspannung die notwendig ist, um Versetzungen zu bewegen, ist abhängig von der Zahl der im Metallgitter gelösten Fremdatome. Das lässt sich wie folgt erklären: Ein Fremdatom, das sich wie der Kohlenstoff im Eisen zwischen den Atomen anlagert benötigt Platz und drängt die Atome in seiner Umgebung zur Seite. Dadurch entsteht Druckspannung im Kristallgitter. Befindet sich ein Fremdatom in der Nähe einer laufenden Versetzung, dann kann sich die Versetzungslinie in diesem Bereich nicht weiterbewegen, weil das Druckspannungsfeld der Bewegung der Versetzung entgegenwirkt (Abbildung 21). Bei einem gehärteten Stahl ist die Zahl der Kohlenstoffatome im Martensit so hoch, dass sich die Versetzungen nicht mehr bewegen können, weil der ganze Kohlenstoff im Martensit gelöst ist und nicht in den Zementit ausweicht. Wenn aber keine Bewegung der Versetzungen möglich ist, gibt es auch keine Gleitstufen und keine bleibende Verformung. Der gehärtete Stahl bleibt elastisch und dehnt sich ohne Einschnürung bis zum Bruch. Es gibt bei dem gehärteten Stahl also keine Streckgrenze und weil auch keine Einschnürung vorkommt ist die Zugfestigkeit viel höher als bei einem nicht gehärteten Stahl. Ein Nachteil ist allerdings, dass der gehärtete Stahl nur sehr kleine Dehnungen verträgt und deshalb sehr spröde ist.

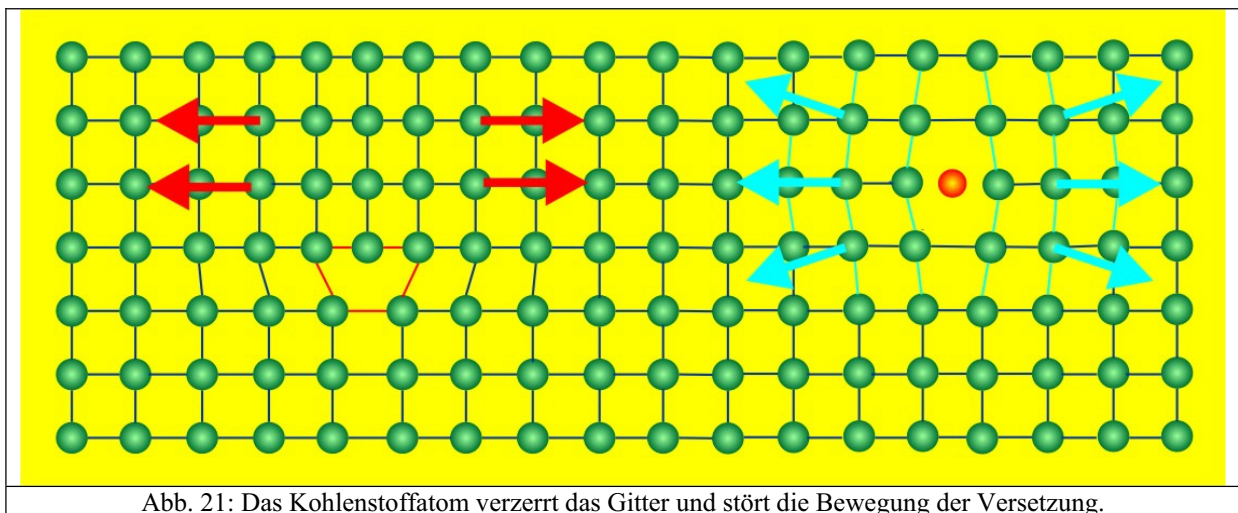


Abb. 21: Das Kohlenstoffatom verzerrt das Gitter und stört die Bewegung der Versetzung.

Aus diesem Grund gibt es keinen Idealen Stahl, sondern nur einen Stahl, der für seine Funktion optimiert ist. Rasierklingen sollen z. B. sehr Hart sein und werden deshalb gehärtet. Ein Karosserieblech beim Auto muss sich hingegen gut plastisch verformen lassen, um bei einem Unfall viel kinetische Energie absorbieren zu können; das schützt den Fahrer. Diese Bleche dürfen also nicht gehärtet sein. Zahnräder in einem Getriebe sollen an der Oberfläche Hart sein, damit sie sich nur langsam abnutzen. Im Inneren müssen sie zäh sein, um bei schlagartigen Belastungen gut zu Überstehen. Zahnräder werden deshalb nur an der Oberfläche gehärtet. Es gibt zahlreiche weitere Möglichkeiten, durch Temperaturbehandlungen, Verformung wie Schmieden und Walzen sowie durch chemische Zusätze die Eigenschaften von Stählen zu verändern. Deshalb sind allein in Deutschland über 2000 Stahlsorten bekannt. Das heißt aber nicht, dass alle Geheimnisse des Stahls gelüftet sind. Der Werkstoff Stahl hat seine Faszination in der Forschung nicht eingebüßt und verspricht durch sein Potential auch für die nächsten Jahrzehnte interessante Neuerungen für Maschinenbau und Technik.