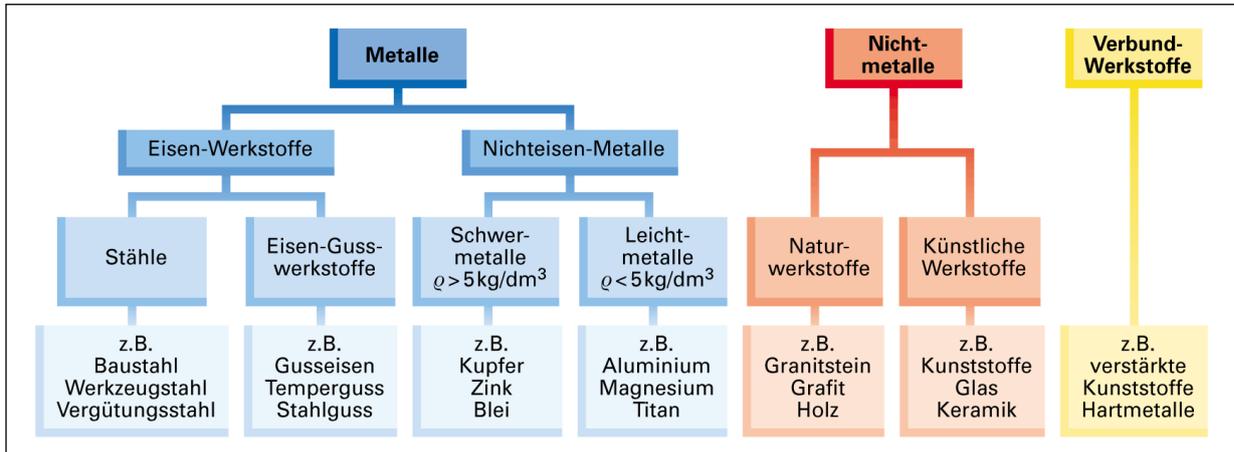


# Werkstofftechnik

## 1 Einteilung der Werkstoffe

Um einen Überblick über die Vielfalt der Werkstoffe zu erhalten, ordnet man sie nach ihrer Zusammensetzung oder gemeinsamen Eigenschaften in Gruppen (Bild 1). Die drei Hauptgruppen der Werkstoffe sind die Metalle, die Nichtmetalle und die Verbundwerkstoffe. Sie können dann nochmals in Untergruppen unterteilt werden, wie z.B. die Eisenwerkstoffe in Stähle und Eisen-Gusswerkstoffe oder die Nichteisenmetalle in Schwer- und Leichtmetalle.



**Bild 1:** Einteilung der Werkstoffe in Werkstoffgruppen

### • Stähle

Stähle sind Eisen-Basiswerkstoffe mit großer Festigkeit. Aus ihnen werden vor allem Maschinenteile hergestellt, die Kräfte aufnehmen und übertragen müssen: Schrauben, Bolzen, Zahnräder, Profile, Wellen (Bild 2).

### • Eisen-Gusswerkstoffe

Eisen-Gusswerkstoffe sind gut vergießbare Werkstoffe. Sie werden zu Bauteilen gegossen, deren schwierige Form am besten durch Gießen herstellbar ist, z. B. Maschinengehäuse (Bild 2).

### • Schwermetalle ( $\rho > 5 \text{ kg/dm}^3$ )

Schwermetalle sind z. B. Kupfer, Zink, Chrom, Nickel, Blei. Sie werden meist wegen besonderer werkstofftypischer Eigenschaften verwendet:

Kupfer z.B. wegen seiner guten elektrischen Leitfähigkeit für Wicklungsdrähte (Bild 3, links).

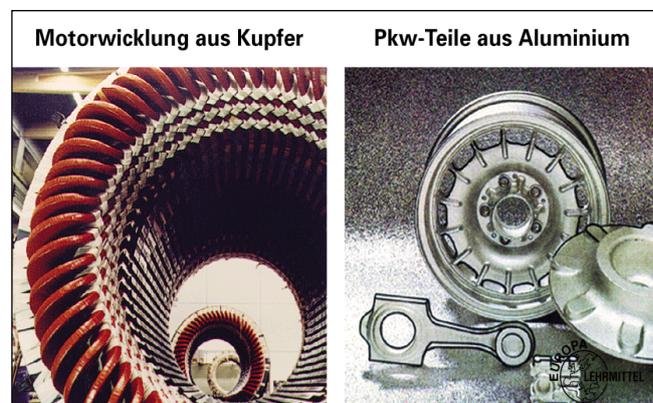
Chrom und Nickel z.B. als Legierungselement in Stählen, um bestimmte Eigenschaften zu verbessern.

### • Leichtmetalle ( $\rho < 5 \text{ kg/dm}^3$ )

Leichtmetalle sind Aluminium, Magnesium und Titan. Es sind leichte Werkstoffe mit zum Teil hoher Festigkeit. Ihr Hauptanwendungsgebiet sind Leichtbauteile z. B. für Pkw und Flugzeuge (Bild 3, rechts).



**Bild 2:** Werkstoffe aus Stahl und Eisenwerkstoffen



**Bild 3:** Bauteile aus Nicht-Eisen-(NE-)Metallen

- **Natur-Werkstoffe**

Dies sind in der Natur vorkommende Stoffe wie Gesteine oder Holz. Verwendung: z.B. Granit als Platte eines Prüftisches .

- **Künstliche Werkstoffe**

Zu ihnen zählt die große Gruppe der Kunststoffe sowie die Gläser und Keramiken.

**Kunststoffe** sind leicht, elektrisch isolierend und in Sorten von gummiartig bis formstabil und hart erhältlich. Ihre Verwendung ist äußerst vielseitig und reicht vom Reifenwerkstoff bis zu Getriebebauteilen.

**Keramische Werkstoffe** werden vor allem wegen ihrer Härte und Verschleißfestigkeit eingesetzt, z. B. als Schneidplatten, Düsen, Gleitringe.

- **Verbundwerkstoffe**

Verbundwerkstoffe sind aus mehreren Werkstoffen zusammengesetzt und vereinen die positiven Eigenschaften der Einzelwerkstoffe in einem neuen Werkstoff.

Glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) z.B. sind hochfest, zähelastisch und leicht.

Ein anderer Verbundwerkstoff, die Hartmetalle, besitzen die Härte der Hartstoffkörner und die Zähigkeit des zusammenhaltenden Metalls. Hartmetalle werden als Schneidstoffe verwendet.

## 2 Auswahl und Eigenschaften der Werkstoffe

Eine Maschine besteht aus einer Vielzahl von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen. Jedes Bauteil hat eine bestimmte Aufgabe zu erfüllen und ist aus einem dazu geeigneten Werkstoff gefertigt.

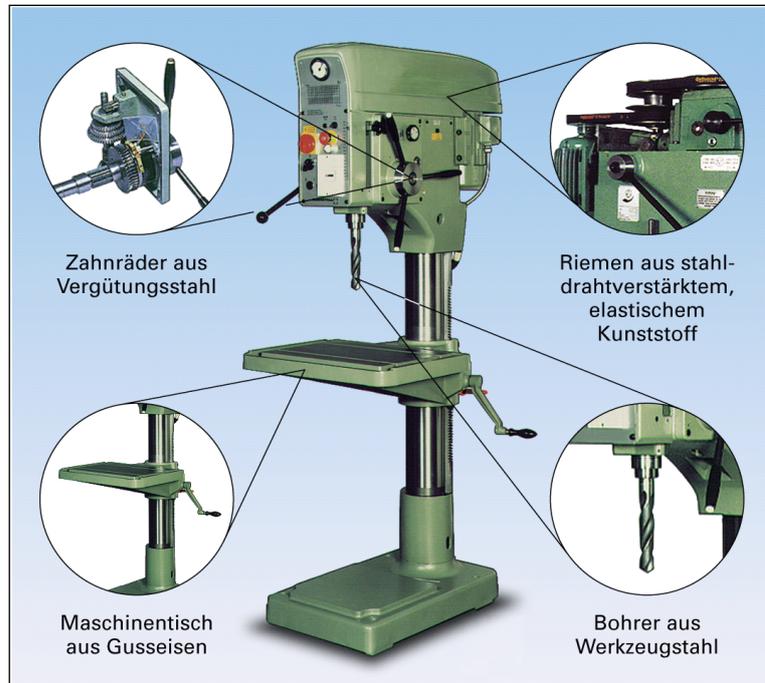
### **Beispiel: Werkstoffe der Bauteile einer Bohrmaschine (Bild 4)**

Die Zahnräder des Handvorschubgetriebes z.B. müssen die Handkraft auf die heruntergehende Bohrspindel übertragen. Dazu ist ein Werkstoff mit hoher **Festigkeit** erforderlich, z.B. ein Vergütungsstahl.

Der Bohrer muss aus einem Werkstoff mit großer **Härte** gefertigt sein, damit er in den zu bohrenden Werkstoff eindringen und Späne abheben kann. Er besteht z.B. aus gehärtetem Werkzeugstahl.

Der Riemen des Riementriebs muss **elastisch** sein und große Zugkräfte übertragen können. Dies kann z. B. ein gummiartiger Kunststoff mit Stahldrahteinlage leisten.

Der Fuß und der Tisch der Bohrmaschine müssen wegen ihrer schwierigen Form gegossen werden. Sie sollen zudem die Schwingungen dämpfen. Dazu ist ein Eisen-Gusswerkstoff am besten geeignet.



**Bild 4:** Werkstoffe der Bauteile einer Bohrmaschine

## 2.1 Werkstoffauswahl

Bei der Auswahl eines geeigneten Werkstoffs für ein Maschinenteil sind die vom Bauteil zu leistenden Aufgaben klar zu beschreiben und danach die Forderungen an den Werkstoff zu formulieren (Tabelle 1).

Forderung an den Werkstoff	Erforderliche Eigenschaften
Ist der Werkstoff z.B. aufgrund seines Gewichts, seiner Schmelztemperatur oder seines elektrischen Leitvermögens für diese Aufgabe geeignet?	Antwort geben die <b>physikalischen Eigenschaften</b> des Werkstoffs, wie Dichte, Schmelzpunkt und elektrische Leitfähigkeit.
Kann der Werkstoff den auf das Bauteil einwirkenden Kräften standhalten?	Dies beantworten die <b>mechanisch-technologischen Eigenschaften</b> , wie Festigkeit, Härte, Elastizität.
Verschleißt der Werkstoff an Gleitflächen?	Auskunft darauf geben die <b>Verschleißeigenschaften</b> .
Mit welchem Fertigungsverfahren lässt sich das Bauteil kostengünstig fertigen?	Hierüber informieren die <b>fertigungstechnischen Eigenschaften</b> , wie Gießbarkeit und Spanbarkeit.
Wird der Werkstoff des Bauteils bei seinem vorgesehenen Verwendungszweck von umgebenden Stoffen oder bei erhöhter Temperatur angegriffen?	Dieses Verhalten beschreiben die <b>chemisch-technologischen Eigenschaften</b> , wie das Korrosionsverhalten und die Zunderbeständigkeit.

**Tabelle 1:** Technische Aufgabe des Werkstoffs und Werkstoffauswahl

Nach Abwägung aller Gesichtspunkte wird für ein Bauteil der Werkstoff ausgewählt,

- der die Funktion des Bauteils und die technischen Anforderungen am besten erfüllt,
- dessen Fertigung und Werkstoffpreis am günstigsten ist und
- der bei der Fertigung und nach dem Gebrauch keine Belastung für die Umwelt darstellt.

Auf die mechanisch-technologischen Eigenschaften und die Verschleißeigenschaften wird im Folgenden näher eingegangen

### 2.1.1 Mechanisch-technologische Eigenschaften

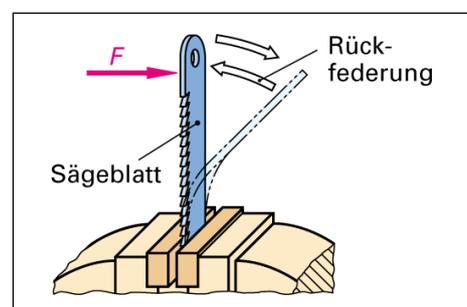
Die mechanisch-technologischen Eigenschaften kennzeichnen das Werkstoffverhalten unter der Wirkung von Kräften bei der Herstellung und der technischen Verwendung.

#### a) Verformungsverhalten

##### Elastische Verformung

Unter der Wirkung einer Kraft verformen sich die verschiedenen Werkstoffe ganz unterschiedlich.

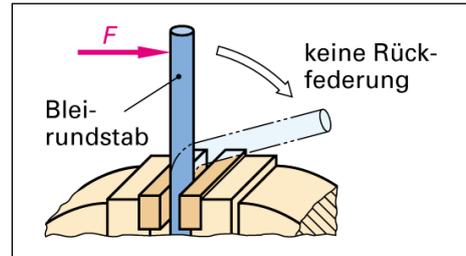
Ein Sägeblatt aus gehärtetem Werkzeugstahl z.B. lässt sich biegen und federt nach Wegnahme der Kraft wieder in seine ursprüngliche, gerade Form zurück (Bild 5). Dieses Verhalten nennt man elastische Verformung oder Elastizität des Werkstoffs. Rein elastisches Verformungsverhalten haben z.B. die Stähle für Sägeblätter oder für Federn.



**Bild 5:** Elastizität eines Sägeblattes

### Plastische Verformung

Ein Stab aus Blei hingegen behält nach dem Biegen zum überwiegenden Teil die Verformung bei (Bild 6). Dieser Werkstoff verformt sich annähernd rein plastisch. Diese Eigenschaft nennt man die Plastizität des Werkstoffs. Überwiegend plastisch verformbar sind z. B. auf Schmelztemperatur erwärmter Stahl oder Weicheisen.



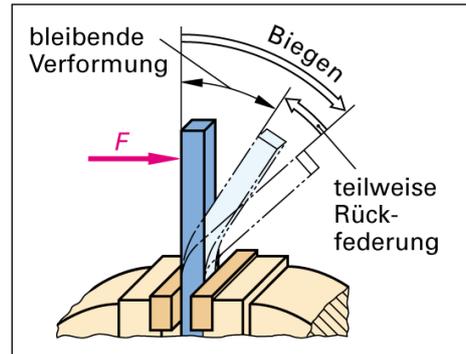
**Bild 6:** Plastizität eines Bleistabes

### Elastisch-plastisches Verformungsverhalten

Ein Vierkantstab aus unlegiertem Baustahl zeigt beim Biegen sowohl elastische als auch plastische Verformung:

Bei starkem Biegen federt der Stab nur noch teilweise zurück. Es verbleibt eine bleibende plastische Verformung (Bild 7). Der Werkstoff hat bei starker Belastung eine elastisch-plastische Verformung. Elastisch-plastisches Verformungsverhalten zeigen viele Werkstoffe, wie z. B. ungehärtete Stähle, Aluminium- und Kupfer-Legierungen.

Die verschiedenen Werkstoffe können elastisches, plastisches und elastisch-plastisches Verformungsverhalten haben.



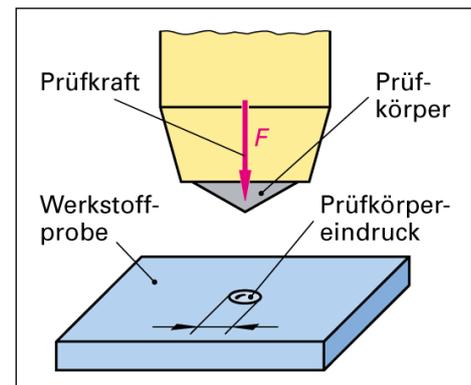
**Bild 7:** Elastisch-plastische Verformung eines Stabstahls

### b) Zähigkeit, Sprödigkeit, Härte

Als **zäh** bezeichnet man einen Werkstoff, der sich elastisch-plastisch verformen lässt, der Verformung aber großen Widerstand entgegensetzt. Baustähle oder die nichtrostenden Stähle z.B. sind zähe Werkstoffe.

**Spröde** nennt man Werkstoffe, die bei schlagartiger Beanspruchung in Bruchstücke zerspringen. Keramiken und Glas, aber auch einige Gusseisensorten und unsachgemäß gehärteter Stahl sind spröde.

Unter **Härte** versteht man den Widerstand, den ein Werkstoff dem Eindringen eines Prüfkörpers entgegensetzt. (Bild 8).



**Bild 8:** Bestimmung der Härte

Harte Werkstoffe sind z. B. gehärteter Stahl, die Hartmetalle und hartkeramische Werkstoffe.

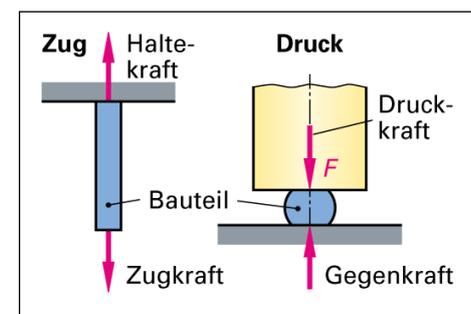
Weiche Werkstoffe sind Aluminium und Kupfer. Große Härte benötigen z.B. Werkzeuge sowie Gleit- und Verschleißflächen von Maschinen.

### c) Festigkeitswerte

Je nachdem, in welcher Richtung Kräfte auf ein Bauteil wirken, herrschen im Werkstoff unterschiedliche Beanspruchungen. Wirken zwei Kräfte in entgegengesetzter Richtung vom Bauteil weg auf einer Wirkungslinie, so liegt **Zugbeanspruchung** vor (Bild 9).

Bei Einwirkung zweier Kräfte von entgegengesetzten Seiten auf das Bauteil hin herrscht **Druckbeanspruchung**.

Weitere Beanspruchungsarten sind **Biegung**, **Scherung**, **Verdrehung** und **Knickung** (Bild 10).

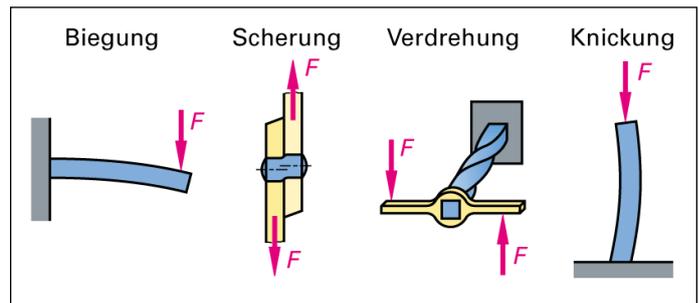


**Bild 9:** Zug- und Druckbeanspruchung

Für jede Beanspruchungsart hat ein Werkstoff eine **höchste Belastungsgrenze**, die man **Festigkeit** nennt.

Je nach Beanspruchungsart heißen diese Belastungsgrenzen **Zugfestigkeit, Druckfestigkeit, Scherfestigkeit** usw. **Biege-festigkeit,**

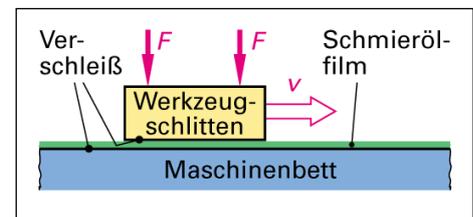
In der Technik haben die Werkstoff-Kennwerte bei Zugbelastung die größte Bedeutung.



**Bild 10:** Weitere Beanspruchungsarten

### 2.1.2 Verschleißfestigkeit

Zwischen sich gegeneinander bewegenden Maschinenteilen tritt Reibung und Verschleiß der Bauteiloberflächen auf (Bild 11). Die Verschleißfestigkeit eines Bauteils hängt außer von der Werkstoffpaarung und dem Schmiermittel von den Beanspruchungen ab: Kräfte, Geschwindigkeiten, Temperatur, Zeitdauer, Bewegungsart und umgebende Atmosphäre.



**Bild 11:** Verschleiß an Gleitflächen

### 2.1.3 Weitere Eigenschaften

Neben den mechanisch-technologischen- und Verschleißeigenschaften werden Werkstoffe nach den:

- physikalischen Eigenschaften (Dichte, Schmelzpunkt, elektrische Leitfähigkeit, thermische Längenausdehnung, Wärmeleitfähigkeit)
  - fertigungstechnischen Eigenschaften (Gießbarkeit, Umformbarkeit, Zerspanbarkeit, Schweißbarkeit, Härtebarkeit)
  - chemisch technologischen Eigenschaften (Korrosionsverhalten, Brennbarkeit)
- sowie der Umweltverträglichkeit und Gesundheitschädlichkeit eingeteilt.

## 2.2 Werkstoffprüfung

Die mechanisch-technologischen Eigenschaften werden durch verschiedene Werkstoffprüfverfahren ermittelt. Nachfolgend werden drei dieser Verfahren vorgestellt.

### 2.2.1 Zugversuch

Der Zugversuch (DIN 50 145) dient zur Bestimmung der mechanischen Kennwerte eines Werkstoffes bei Zugbeanspruchung. Er wird mit einer runden oder flachen Zugprobe durchgeführt (Bild 12, rechts oben). Bei runden Zugproben ist die Anfangsmesslänge  $L_0$  fünfmal so groß wie ihr Durchmesser  $d_0$ .

Der Zugversuch wird auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt (Bild 12).

Die Zugprobe wird an den Einspannenden in den unteren und oberen Spannkopf der Prüfmaschine eingespannt. Dann wird die Prüfmaschine in Gang gesetzt: Das Joch mit dem oberen Spannkopf fährt langsam mit **konstanter Geschwindigkeit** nach oben. Die Zugprobe wird bis zum Bruch (Bild 13, oben rechts) in die Länge gezogen.

Während des Zugversuchs werden mit einer Messeinrichtung die auf die Zugprobe wirkende **Zugkraft F** und ihre **Verlängerung ΔL** fortlaufend gemessen.

Um die Größe der Zugbeanspruchung in einem Bauteil, **unabhängig von der Bauteilgröße**, zu beschreiben, bezieht man die einwirkende Zugkraft F auf den Bauteilquerschnitt S<sub>0</sub> (Querschnitt der unbelasteten Probe, Anfangsquerschnitt).

Diese Größe nennt man **Zugspannung σ<sub>z</sub>**. Ihre Einheit ist N/mm<sup>2</sup>.

**Zugspannung**      $\sigma_z = F/S_0$

Die auf die Ausgangslänge L<sub>0</sub> bezogene Verlängerung ΔL in Prozent nennt man **Dehnung ε**.

**Dehnung**      $\epsilon = (\Delta L/L_0) \cdot 100\%$

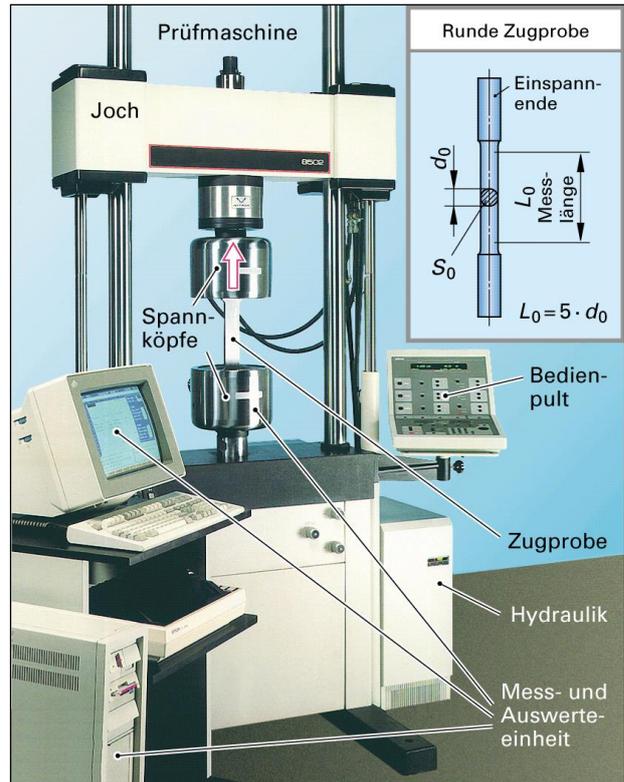
In der Auswerteeinheit der Prüfmaschine werden die **Zugspannung σ<sub>z</sub>** und die **Dehnung ε** berechnet und auf einem Monitor (Bild 12) als Kurve im **Spannungs-Dehnungs-Diagramm** aufgezeichnet.

Bis zum Höchstwert der Zugkraft verlängert sich die Zugprobe ohne deutlich sichtbare Querschnittsveränderung (Bild 13).

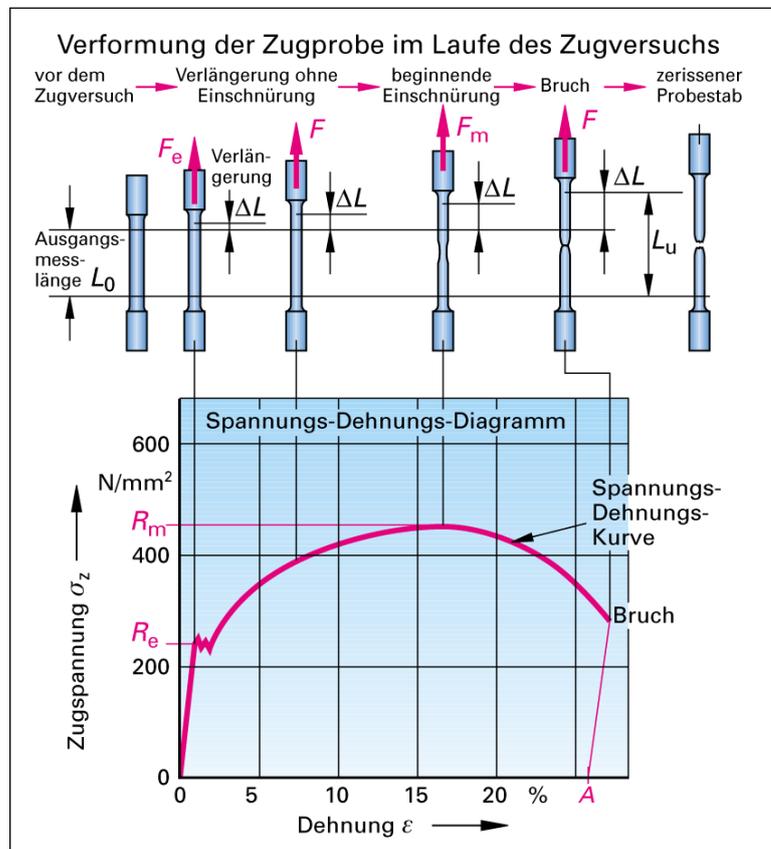
Dann schnürt sich die Zugprobe etwa in der Mitte ein, verlängert sich dort beträchtlich und zerreißt schließlich an dieser Stelle. Während des Einschnürens der Zugprobe sinkt die Zugkraft immer mehr ab.

Beim Zerreißen fällt sie auf null.

**Bild 13:** Verformung einer Zugprobe und Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Stahls mit ausgeprägter Streckgrenze



**Bild 12:** Zugversuch auf der Universalprüfmaschine



## Kenngrößen

Als Kenngrößen für die Belastbarkeit eines Werkstoffs benutzt man die in einem Probestab herrschenden **Zugspannungen bei bestimmten Verformungszuständen** (Bild 14). Wird der Probestab mit einer kleinen Zugkraft belastet, so dehnt er sich zunächst nur elastisch. Dies gilt, so lange die Zugkraft unter der Grenzkraft der elastischen Verformung  $F_e$  bleibt. Steigert man die Zugkraft über  $F_e$ , dann beginnt sich der Stab erheblich zu verlängern. Man sagt, der Werkstoff "wird gestreckt". Diese Verformung ist überwiegend plastisch.

- Die Zugspannung, die unmittelbar vor Beginn des Streckens im Werkstoff herrscht, nennt man **Streckgrenze  $R_e$** . Sie berechnet sich als Quotient aus der Kraft  $F_e$  und dem Stabquerschnitt  $S_0$  und ist eine Kenngröße (Grenzwert) für die Belastbarkeit eines Werkstoffs ohne wesentliche plastische Verformung.

$$\text{Streckgrenze} \quad R_e = F_e / S_0$$

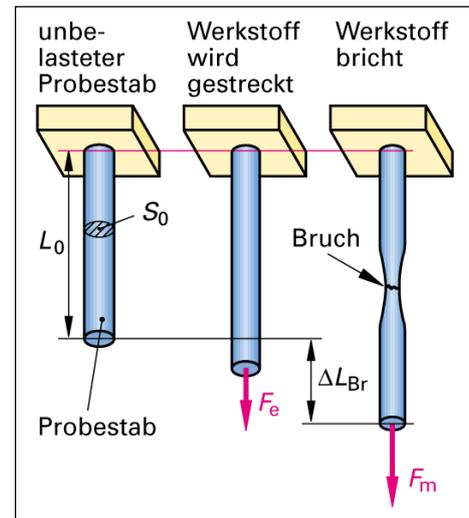
- Wird die Zugbeanspruchung auf den Probestab über die Streckgrenze hinaus gesteigert, so beginnt er sich einzuschnüren und zerreißt schließlich (Bild 14). Die bei der größten Zugkraft  $F_m$  im Werkstoff herrschende Zugspannung ist die **Zugfestigkeit  $R_m$** . Sie berechnet sich als Quotient aus  $F_m$  und  $S_0$  und ist die maximale Zugspannung, die in einem Werkstoff herrschen kann.

$$\text{Zugfestigkeit} \quad R_m = F_m / S_0$$

Die Streckgrenze  $R_e$  und die Zugfestigkeit  $R_m$  haben die gleiche Einheit  $\text{N/mm}^2$ . Der Stahl S235JR hat z. B. eine Streckgrenze von  $R_e = 235 \text{N/mm}^2$  und eine Zugfestigkeit von  $R_m = 360 \text{N/mm}^2$ .

- Durch die einwirkende Kraft verlängert sich der Probestab (Bild 14). Die bleibende Dehnung nach dem Bruch des Probestabes heißt **Bruchdehnung  $A$** . Sie ist ein Maß für die größtmögliche Dehnung eines Werkstoffes.

$$\text{Bruchdehnung} \quad A = (\Delta L_{Br} / L_0) \cdot 100\%$$



**Bild 14:** Probestab, unbelastet und unter Zugbeanspruchung

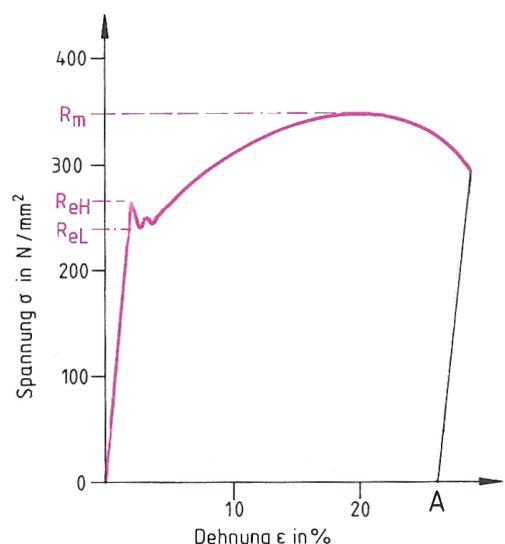
### a) Kennwerte für Werkstoffe mit ausgeprägter Streckgrenze

Unlegierter Baustahl, hat eine Spannungs-Dehnungs-Kurve mit **ausgeprägter Streckgrenze** (Bild 15). Bei ihm steigt die Spannung  $\sigma_z$  im Anfangsbereich proportional (in gleichem Maß) mit der Dehnung  $\epsilon$  an. Deshalb ist die Kurve im Anfangsbereich eine Gerade. Es gilt das Hooke'sche Gesetz.

Bei Erreichen einer bestimmten Spannung, man nennt sie **Streckgrenze  $R_e$** , verlängert sich die Zugprobe erheblich bei gleich bleibender Zugkraft: Die Probe wird "gestreckt".

Nach dem Streckbereich steigt die Spannung in der Zugprobe langsam bis zum höchsten Punkt der Kurve. Diesen Höchstwert der Spannung bezeichnet man als **Zugfestigkeit  $R_m$** .

Danach fällt die Kurve ab. Die Zugprobe schnürt sich immer mehr ein und zerreißt schließlich. Die bleibende Dehnung, die die Zugprobe nach dem Bruch hat, heißt **Bruchdehnung  $A$** .

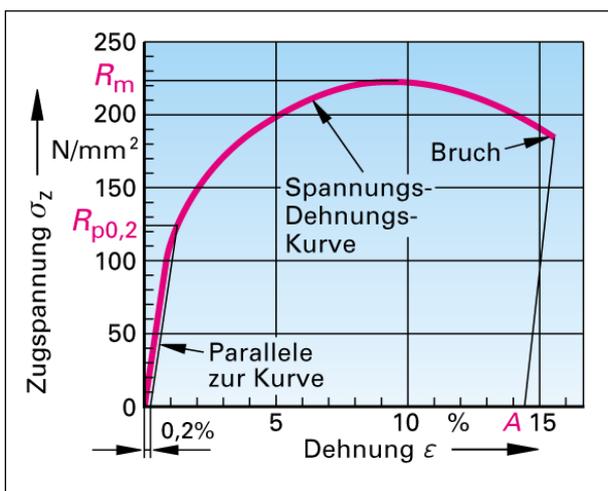


**Bild 15:**  $\sigma, \epsilon$ -Diagramm mit ausgeprägter Streckgrenze

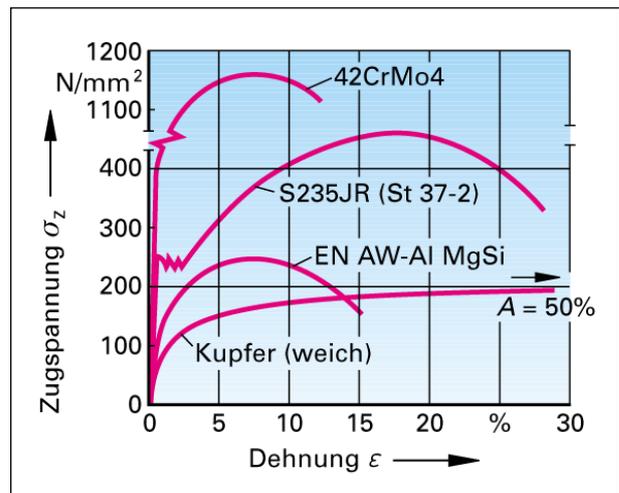
### b) Kennwerte für Werkstoffe ohne ausgeprägte Streckgrenze

Bei Werkstoffen **ohne ausgeprägte Streckgrenze**, wie z. B. bei Aluminium- und Kupfer-Werkstoffen oder bei gehärtetem Stahl hat die Spannungs-Dehnungs-Kurve keine Streckgrenze. Die Kurve steigt vom Beginn als Gerade an, geht dann übergangslos in eine gekrümmte Kurve über und fällt nach Überschreiten eines Höchstwertes wieder bis zum Bruch ab (Bild 16).

Die Spannung im höchsten Punkt der Kurve wird auch hier als **Zugfestigkeit  $R_m$**  bezeichnet, die bleibende Dehnung beim Bruch ist die **Bruchdehnung  $A$**  (Berechnungsformeln siehe oben). Da bei Werkstoffen mit diesem Spannungs-Dehnungs-Verlauf eine Streckgrenze fehlt, diese aber für die Festigkeitsberechnung wichtig ist, hat man als Ersatz die **0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$**  eingeführt. Dies ist die Spannung, bei der die Zugprobe nach Entlastung eine bleibende Dehnung von 0,2% aufweist. Bestimmt wird die 0,2%-Dehngrenze  $R_{p0,2}$  in der Spannungs-Dehnungs-Kurve mit einer Parallelen zur Geraden am Kurvenanfang durch den Punkt  $\epsilon = 0,2\%$  (Bild 16).



**Bild 16:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm einer Aluminiumlegierung ohne ausgeprägte Streckgrenze



**Bild 17:** Spannungs-Dehnungs-Diagramm verschiedener Werkstoffe

*Beispiel:*

Der in Bild 15 dargestellte Aluminium-Werkstoff hat eine 0,2 Dehngrenze von  $R_{p0,2} = 120 \text{ N/mm}^2$ .

#### Aufgabe zum Lehrerversuch:

Notiere zu Versuchsbeginn folgendes:

- Material
- Messlänge
- Probendurchmesser

Ermittle durch den Versuch nachfolgende Größen:

- Streckgrenze
- Zugfestigkeit
- Bruchdehnung (aus Diagramm und aus Längenmessung der zerrissenen Probe)
- Maximale Zugkraft

## 2.2.2 Härteprüfung

Bei diesen Verfahren wird der Widerstand geprüft, den ein Werkstoff dem Eindringen eines härteren Prüfkörpers entgegensetzt. Man bezeichnet diese Werkstoffeigenschaft **Härte**.

Die große Bedeutung dieser Verfahren liegt darin, dass ein Werkstoffkennwert einfach und schnell ermittelt wird. Die Prüfungen können oft an fertigen Bauteilen ermittelt werden, da nur geringe Eindrücke entstehen.

In der Praxis verwendet man drei Verfahren:

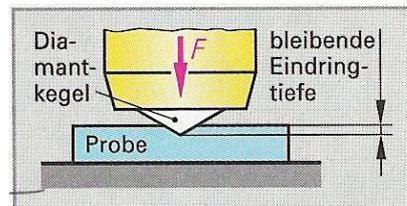
- Härteprüfung nach Brinell (DIN 50 351)
- Härteprüfung nach Vickers (DIN 50 133)
- Härteprüfung nach Rockwell (DIN 50 103)

Die Verfahren unterscheiden sich durch die Prüfbedingungen (Prüfkörper, Prüfkraft und Einwirkdauer) und die Meßgrößen (Eindringtiefe oder Eindruckoberfläche).

Das geeignete Messverfahren wird je nach Härte des Werkstoffs gewählt. So können mit der Brinellhärteprüfung beispielsweise nur weiche und mittelharte Werkstoffe geprüft werden, beispielsweise Blei, Messing, Gusseisen.

### Härteprüfung nach Rockwell

Bei der Härteprüfung nach Rockwell (Bild 18) wird der kegel- oder kugelförmige Prüfkörper zunächst mit der Prüfvorkraft (98 N) belastet und die Meßuhr auf Null gestellt. Danach wird die eigentliche Prüfkraft (z.B. 1373 N beim HRC-Verfahren) aufgelegt und nach kurzer Zeit wieder weggenommen. Die bleibende Eindringtiefe  $h$  des Prüfkörpers kann an der Meßuhr direkt als Rockwellhärte abgelesen werden.



**Bild 18:** Härteprüfung nach Rockwell

Für harte Werkstoffe verwendet man als Prüfkörper einen Diamantkegel mit einem Spitzenwinkel von  $120^\circ$  (z.B. HRC- und HRA-Verfahren).

Weiche Werkstoffe werden mit einer gehärteten Stahlkugel von 1,59 mm oder 3,175 mm Durchmesser geprüft (z.B. HRB- oder HRF-Verfahren).

### Aufgabe zum Lehrerversuch:

Notiere die Versuchsparameter und -ergebnisse.

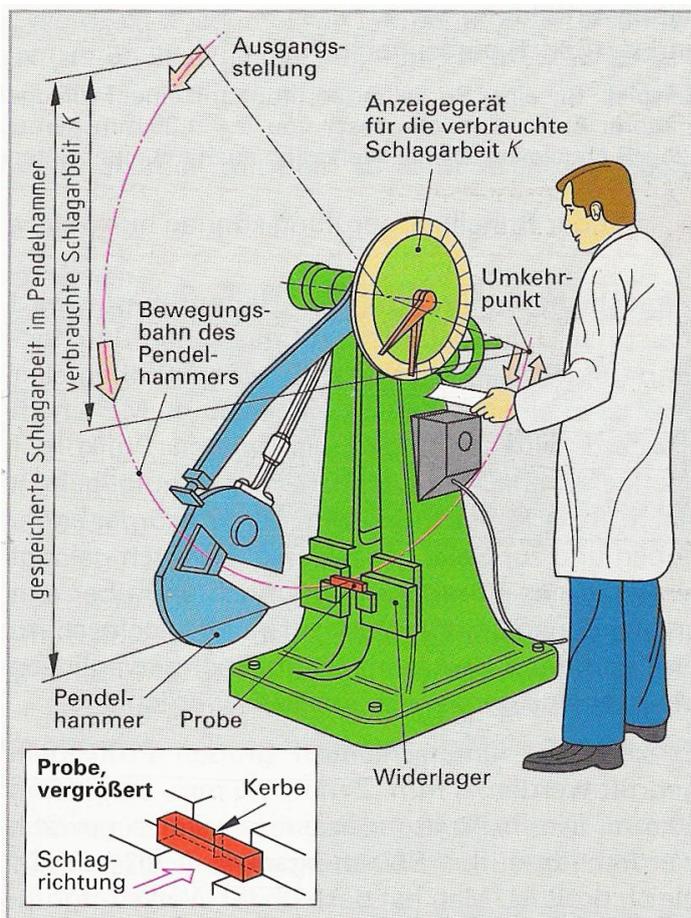
### 2.2.3 Kerbschlagbiegeversuch

Der Kerbschlagbiegeversuch (DIN 50 115) liefert einen Hinweis auf die Zähigkeit eines Werkstoffes.

Beim Versuch liegt eine genormte Probe mit U- oder V-förmiger Kerbe an zwei Widerlagern eines **Pendelschlagwerkes** an (Bild 19).

Der Pendelhammer wird in die Ausgangsstellung gebracht und dann ausgeklinkt. Er fällt auf einer Kreisbahn herunter und trifft waagrecht auf die Probe, die er durchschlägt oder verformt durch die Widerlager zieht. Dabei wird ein Teil der anfänglich im Hammer gespeicherten potentiellen Energie verbraucht. Der Pendelhammer schwingt bis zum Umkehrpunkt weiter, der von einem Schleppzeiger am Anzeigerät festgehalten wird. Die Bewegung des Hammers wird umso mehr gebremst, je zäher der Probewerkstoff ist.

Der Höhenunterschied von Ausgangsstellung und Umkehrpunkt ist ein Maß für die verbrauchte Schlagarbeit  $W_V$ . Sie kann direkt am Anzeigerät abgelesen werden und wird als Prüfergebnis in der Einheit Joule angegeben.



**Bild 19: Kerbschlagbiegeversuch**

#### Aufgabe zum Lehrerversuch:

Notiere die Versuchsparameter und -ergebnisse.

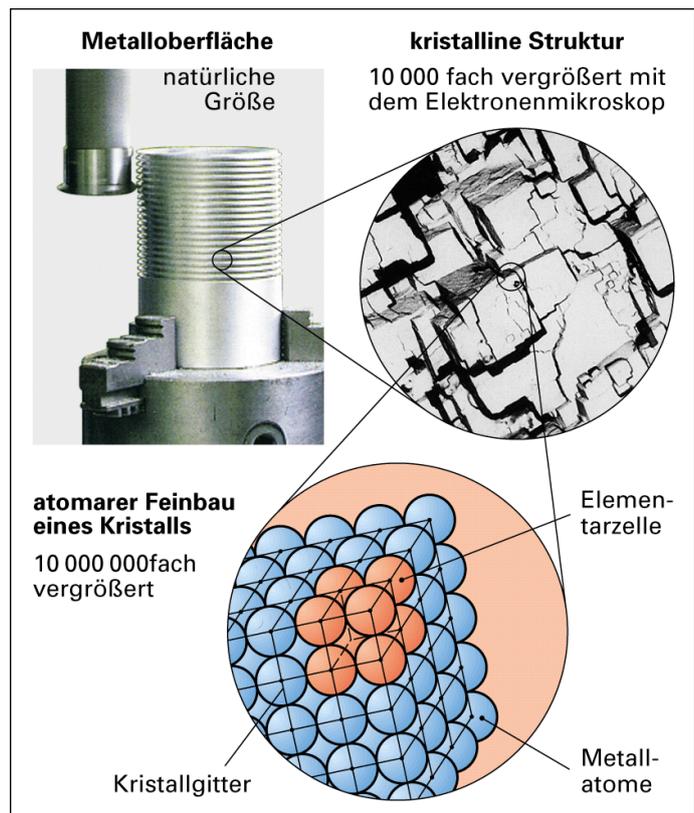
### 3 Innerer Aufbau der Metalle

In natürlicher Größe erscheinen die Metalle als einheitlicher Stoff ohne Untergliederung (Bild 20, links). Betrachtet man die angeätzte Oberfläche eines Metalls rund 10000fach vergrößert, z. B. mit einem Elektronenmikroskop, so sieht man, dass die Metalle einen äußerst komplizierten Feinbau besitzen (Bild 17, rechts). Man erkennt, dass sie sich aus einer Vielzahl kleiner, regelmäßig geformter Körner, auch Kristalle genannt, zusammensetzen.

→ Den Feinbau der Metalle bezeichnet man als kristallinen Aufbau oder als kristalline Struktur.

Vergrößert man die Ecke eines Kristalls noch stärker, z. B. 10'000'000fach, so gelangt man zu den kleinsten Teilchen der Metalle, den Atomen (Bild 20, unten). Sie sind in genauen Abständen und Winkeln angeordnet.

Verbindet man die Mittelpunkte der Metallatome, so ergeben die Verbindungslinien ein räumliches Gitter, das als Raumgitter oder Kristallgitter bezeichnet wird. Die kleinste typische Einheit dieses Kristallgitters nennt man Elementarzelle.



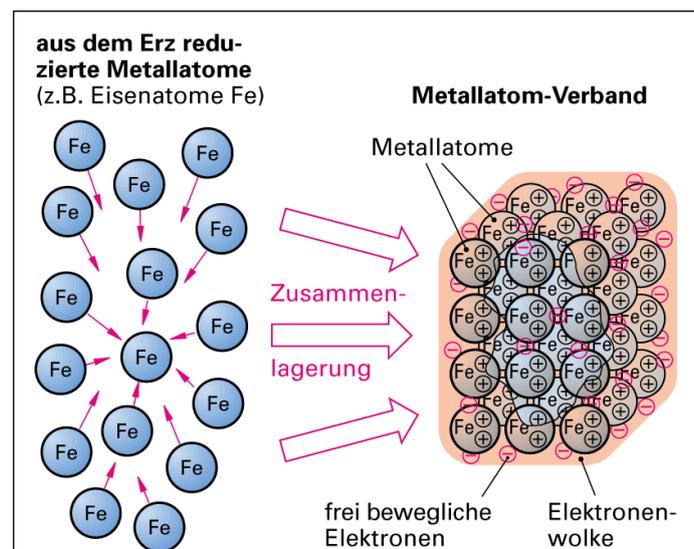
**Bild 20:** Metalloberfläche und innerer Aufbau

### 3.1 Innerer Aufbau, Eigenschaften

#### 3.1.1 Metallbindung und Festigkeit

Im festen Aggregatzustand besitzen die Metalle einen festen Zusammenhalt. Ursache hierfür ist die Metallbindung, die die einzelnen Metallteilchen zusammenhält. Die Metallbindung entsteht bei der Gewinnung des Metalls durch Zusammenlagern der Metallatome direkt nach der Reduktion des Erzes. Dabei werden locker gebundene Elektronen der Metallatome abgegeben (Bild 21). Sie umgeben den Metallatom-Verband als Elektronenwolke. Die Elektronen können sich in der Elektronenwolke frei bewegen, sie aber nicht verlassen. Sie halten die Metallatome wie eine Art "Elektronenkitt" zusammen.

→ Die Metallbindung bewirkt den äußerst festen Zusammenhalt der Metallteilchen und damit die Festigkeit der Metalle.



**Bild 21:** Entstehung der Metallbindung (Beispiel Eisen)

### 3.1.2 Elektrische Leitfähigkeit

Die frei beweglichen Elektronen können durch eine angelegte elektrische Spannung in Bewegung gesetzt werden. Es fließt dann ein Strom von Elektronen (elektrischer Strom).

| → Metalle sind gute elektrische Leiter.

### 3.1.3 Verformungsverhalten der Metalle

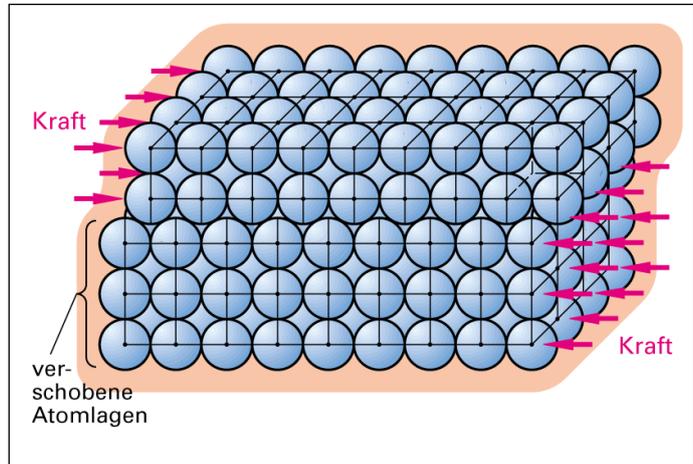
Metalle verformen sich bei geringer Belastung elastisch und bei hoher Belastung zusätzlich plastisch. Dieses Verformungsverhalten beruht auf ihrem kristallinen Feinbau (Bild 22).

Ist die Krafteinwirkung gering, so werden die Metallatome nur geringfügig von ihrem Gitterplatz verdrängt und federn bei Wegnahme der Kraft wieder in ihre Ausgangslage zurück. Sie verformen sich elastisch.

Bei großer Krafteinwirkung kann an einer Stelle des Kristalls die obere Atomlage von der stabilen „Übereinander-Anordnung“ in die ebenfalls stabile „Auf-Lücke-Anordnung“ verschoben werden.

Diese neue stabile Lage bleibt auch

erhalten, wenn die Kraft weggenommen wird. Der Körper hat sich bleibend verformt (plastische Verformung). Nach der Verschiebung wirken wieder ähnlich große Bindungskräfte zwischen den Metallatomen wie vorher. Deshalb erfolgt durch die Verschiebung kein Auseinanderbrechen des Körpers, sondern lediglich eine bleibende Verformung. Die Verformung kann bei fortdauernder Krafteinwirkung so lange fortschreiten, bis alle Metallatomlagen im belasteten Bereich verschoben sind. Erst dann führt weitere Belastung zum Bruch des Körpers.



**Bild 22:** Plastische Verformung eines Kristalls durch Verschieben einer Metallatomlage

## 3.2 Kristallgittertypen (Elementarzellen) der Metalle

Atome der verschiedenen Metalle können sich in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen zusammenfügen. Diese sind von der Metallart und teilweise von der Temperatur abhängig.

| → Die Metalle haben kubisch-raumzentrierte, kubisch-flächenzentrierte oder hexagonale Kristallgitter.

Die grafische Darstellung der Anordnung der Metallatome erfolgt an Hand einer Elementarzelle (Bild 23).

### 3.2.1 Kubisch-raumzentriertes Kristallgitter

Beim kubisch-raumzentrierten Kristallgitter (krz) ordnen sich die Metallatome so, dass die Verbindungslinien von Atommittelpunkt zu Atommittelpunkt einen Würfel (Kubus) bilden (Bild 20, oben). Zusätzlich befindet sich noch ein Metallatom in der Würfelmittle. Ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter hat z. B. Eisen bei Temperaturen unter 911°C sowie Chrom, Wolfram und Vanadium.

### 3.2.2 Kubisch-flächenzentriertes Kristallgitter

Das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter (kfz) hat ebenfalls einen Würfel als Grundkörper und zusätzlich je ein Atom in der Mitte der Seitenflächen (Bild 20, Mitte). Diese Kristallform haben Aluminium, Kupfer und Nickel sowie Eisen über 911 °C.

### 3.2.3 Hexagonales Kristallgitter

Ein hexagonales Kristallgitter (hex) besitzen die Metalle Magnesium, Zink und Titan. Bei diesem Gittertyp bilden die Metallatome ein sechseckiges Prisma mit je einem Atom in der Mitte der Grundflächen sowie drei Atomen innerhalb des Prismas (Bild 23, unten).

## 3.3 Baufehler im Kristall

Die Kristalle eines Metalls sind nicht fehlerfrei, sondern von Fehlern wie Lücken, Versetzungen und Fremdatomen durchsetzt (Bild 24).

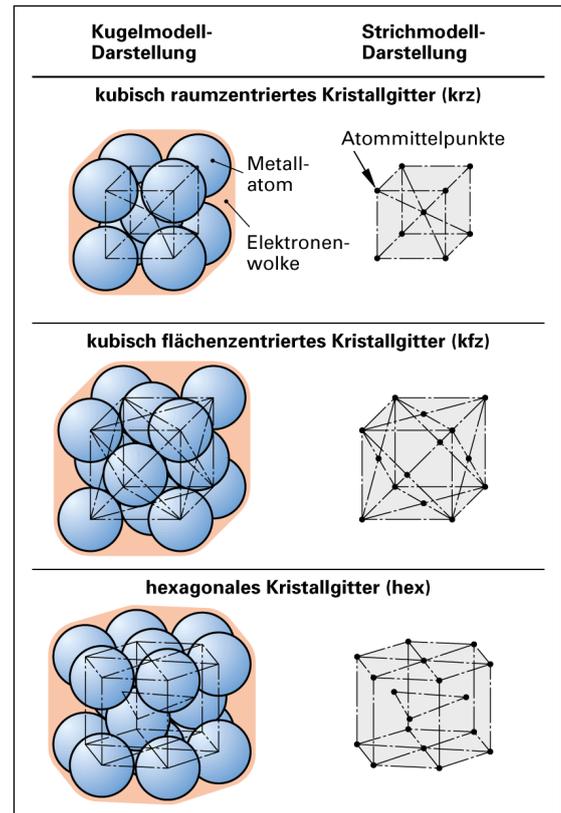
Eine **Lücke** ist ein nicht besetzter Gitterplatz im Kristallgitter. Bei einer **Versetzung** ist eine ganze Lage von Metallatomen eingeschoben oder sie fehlt. **Fremdatome** sind Atome eines anderen Elementes, die in das Kristallgitter des Grundmetalls eingebaut sind.

→ Baufehler bewirken Verzerrungen im Kristallgitter und führen zur Erhöhung der Festigkeit.

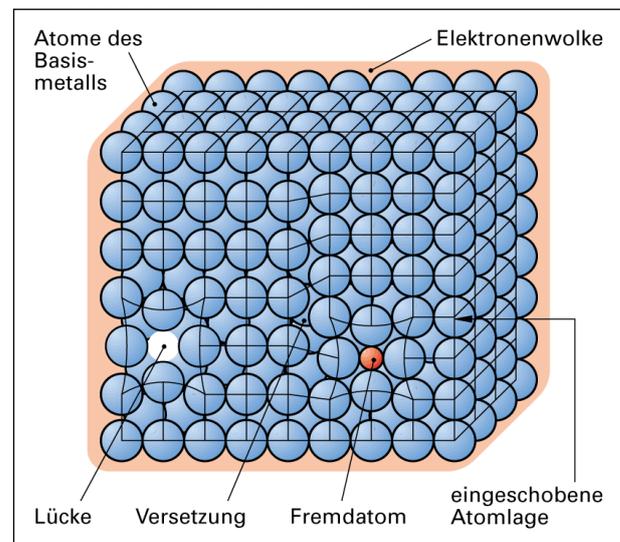
Die festigkeitssteigernde Wirkung tritt z. B. beim Legieren auf. Hierbei werden Fremdatome in das Kristallgitter des Grundmetalls eingelagert.

Bei der Verfestigung durch Kaltverformung z. B. entstehen festigkeitssteigernde Lücken und Versetzungen.

**Bild 24:** Baufehler im Metallkristall



**Bild 23:** Kristallgittertypen

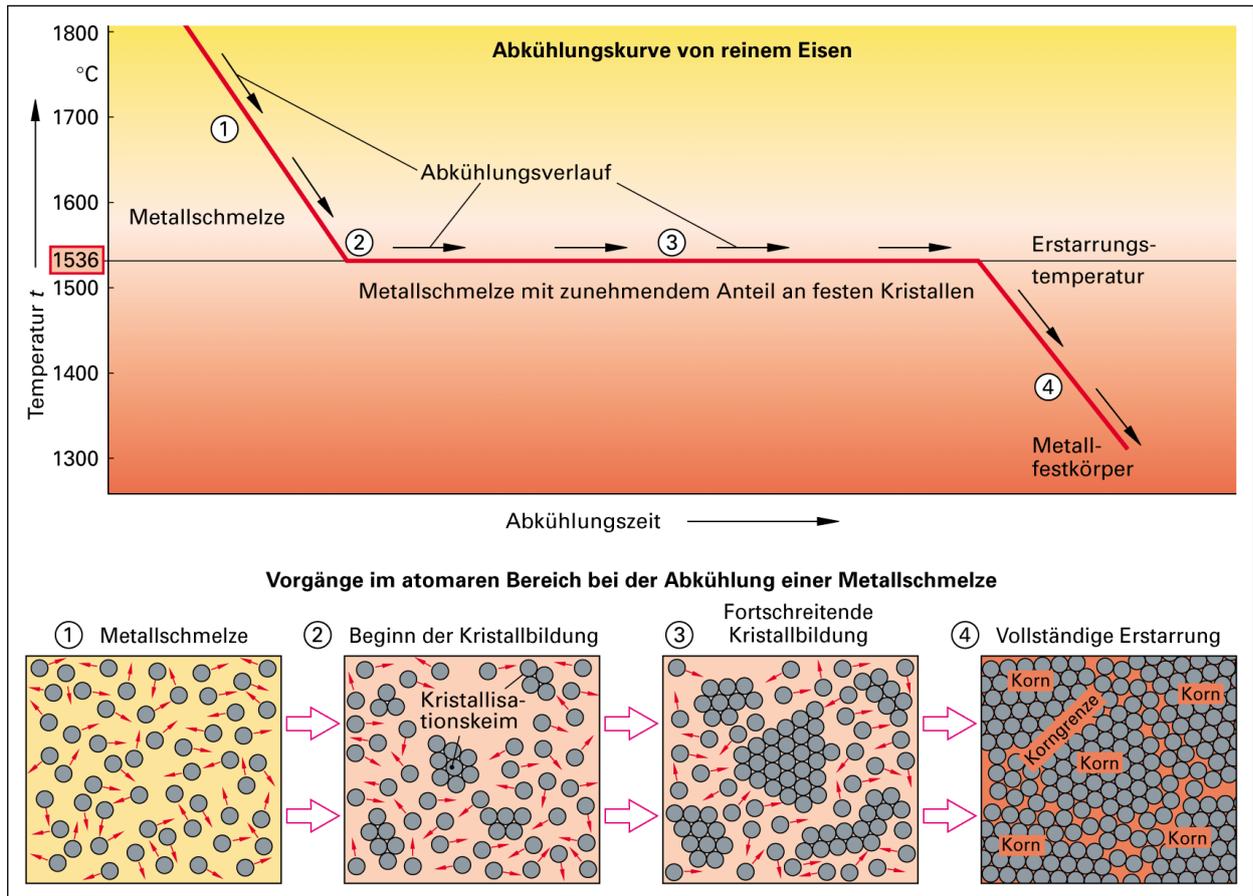


## 3.4 Entstehung des Metallgefüges

Das Gefüge eines metallischen Werkstoffs, d.h. seine Gliederung in Kristalle, entsteht nach dem Vergießen beim Erstarren der Metallschmelze zum festen Metallkörper.

Die Erstarrung einer Metallschmelze verläuft über Zwischenstufen. Beispiel: Die Abkühlung von reinem Eisen und die dabei ablaufenden Vorgänge in der Schmelze (Bild 25)

Es kommt bei den in Bild 2 gezeigten Abkühlungsstufen (1) bis (4) zu folgenden Vorgängen:



**Bild 25:** Abkühlungskurve und kristalline Vorgänge in einer Metallschmelze

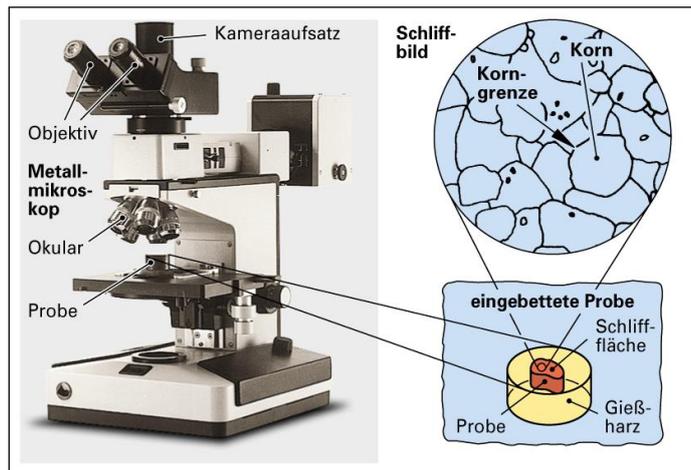
- (1) Metallschmelze.** In der Metallschmelze bewegen sich die Metallatome frei und regellos durcheinander. Bei der Abkühlung der Schmelze wird die Bewegung der Metallatome langsamer.
- (2) Beginn der Kristallbildung.** Bei Erreichen der Erstarrungstemperatur (bei Eisen: 1536°C) in der Schmelze beginnt die Zusammenlagerung der Metallatome nach einem Kristallgittertyp. Die Stellen, an denen das Kristallwachstum beginnt, nennt man **Kristallisationskeime**.
- (3) Fortschreitende Kristallbildung.** Von den **Kristallisationskeimen** ausgehend gliedern sich immer mehr Metallatome aus der Restschmelze den Kristallen an. Die **Temperatur** bleibt während des gesamten Auskristallisierens **unverändert** auf der Erstarrungstemperatur, da die entzogene Wärme zur Kristallbildung verbraucht wird. Die Abkühlungskurve verläuft waagrecht.  
Wenn die Schmelze fast aufgebraucht ist, stoßen die wachsenden Kristalle an ihren Grenzen aneinander. Die dadurch unregelmäßig begrenzten Kristalle nennt man **Kristallite** oder **Körner**. Die Metallatome im Grenzbereich zwischen den Körnern können teilweise nicht in das Kristallgitter eingeordnet werden. Sie bilden zusammen mit Fremdatomen zwischen den einzelnen Körnern eine ungeordnete Begrenzungsschicht, die **Korngrenze**.
- (4) Vollständige Erstarrung.** Haben alle Metallatome ihren festen Platz, so ist die Schmelze vollständig erstarrt. Das **Gefüge** des Werkstoffs hat sich gebildet. Die Temperatur des entstandenen, festen Metallkörpers nimmt durch den Wärmeentzug nun wieder stetig ab, die Abkühlungskurve fällt.

### 3.5 Gefügearten und Werkstoffeigenschaften

Das Gefüge eines Werkstoffs ist mit bloßem Auge nicht sichtbar. Die einzelnen Gefügekörner sind zu klein (im Größenbereich von 1  $\mu\text{m}$  bis 100  $\mu\text{m}$ ) und die Korngrenzen sind nicht zu erkennen.

Um das Gefüge eines Werkstoffs sichtbar zu machen, bedarf es einer besonderen Technik, der Metallografie. Man trennt ein etwa walnussgroßes Stück ab, bettet es in Gießharz ein, schleift es auf einer Seite plan und poliert diese Fläche. Dann wird die polierte Metalloberfläche mit einem Ätzmittel angeätzt und unter einem Metallmikroskop betrachtet (Bild 26).

Das sich darbietende Bild im Mikroskop wird Schliffbild genannt. Es zeigt die Körner und Korngrenzen.



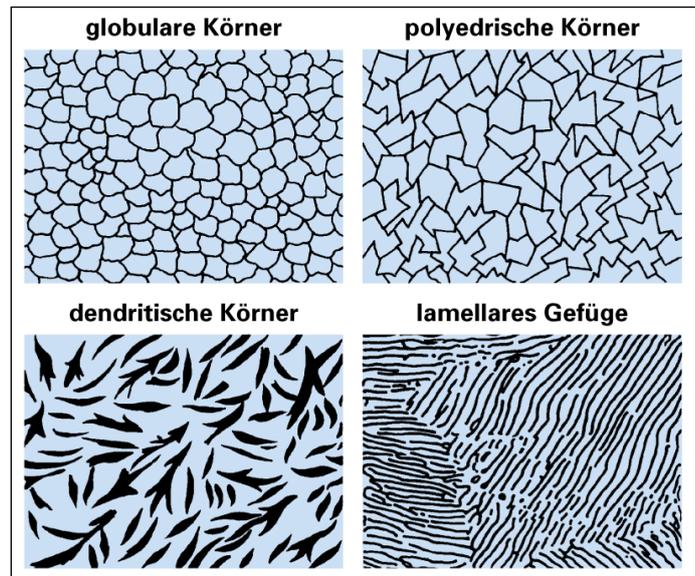
**Bild 26:** Sichtbarmachen eines Schliffbildes

#### Kornformen

Die verschiedenen Metalle und auch die unterschiedlichen Kristallgittertypen eines Metalls bilden bestimmte typische Kornformen (Bild 27).

Reines Eisen bildet z. B. rundliche Körner (globulare Körner). Eisen mit Austenitgefüge hat Vieleckkörner (polyedrisch). Gehärteter Stahl (Martensitgefüge) zeigt nadelartiges Gefüge (dendritisch). Der Streifenzementit des Perlits und der Lamellengrafit von Grauguss bilden lamellenartige Schichten (lamellares Gefüge).

Die Kornform des Gefüges wird z.B. beim Kaltwalzen verändert. Hierbei werden die Körner in Walzrichtung gereckt, das Gefüge hat eine Textur. Die Festigkeit des Werkstoffs wird dadurch in Walzrichtung erhöht, die Dehnbarkeit verringert. Durch Rekrystallisationsglühen kann die Textur wieder aufgehoben werden.

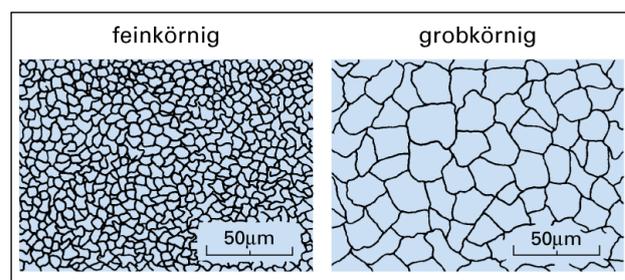


**Bild 27:** Kornformen

#### Korngrößen

Metalle haben Korngrößen von weniger als 1  $\mu\text{m}$  bis zu 100  $\mu\text{m}$  (Bild 28). Ein Werkstoff mit feinkörnigem Gefüge hat eine höhere Festigkeit und eine bessere Dehnbarkeit als mit grobkörnigem Gefüge. Die gewünschte Korngröße kann erzielt werden

- durch Wärmebehandlung, z. B. Normalglühen
- durch Warmumformen, z. B. Warmwalzen
- durch Zugabe von Legierungselementen, wie z. B. Mangan bei den Feinkornbaustählen.



**Bild 28:** Gefüge mit unterschiedlichen Korngrößen

### 3.6 Gefüge reiner Metalle und Gefüge von Legierungen

**Reine Metalle** haben ein einheitliches (homogenes) Gefüge (Bild 29). Alle Körner bestehen aus derselben Metallatomsorte und haben denselben Bauplan nach einem Kristallgittertyp. Bei Eisen z. B. sind die Eisenatome kubisch-raumzentriert angeordnet. Die Körner unterscheiden sich in der Ausrichtung des Kristallgitters. Reine Metalle haben eine relativ geringe Festigkeit.

Die meisten Metalle werden in der Technik nicht als Reine Metalle verwendet, sondern als Legierungen.

**Legierungen** sind Gemische aus mehreren Metallen bzw. Gemische aus Metallen und Nichtmetallen.

Im flüssigen Zustand (Schmelze) sind die Legierungselemente gleichmäßig in der Legierung verteilt.

Beim Erstarren der Schmelze bilden sich je nach Grundmetall und den Legierungselementen unterschiedliche Gefügearten aus.

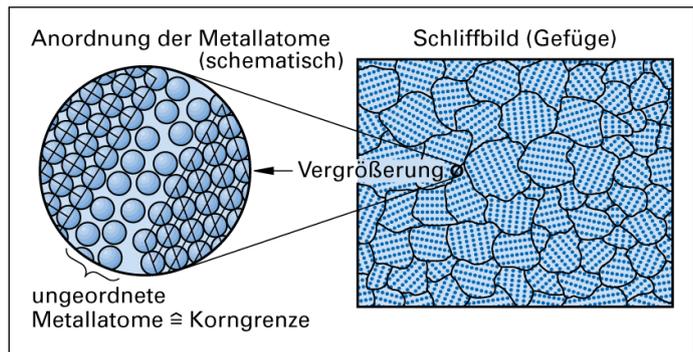
a) Bei **Kristallgemisch-Legierungen** bleiben die verschiedenen Metallatome beim Erstarren der Legierungsschmelze nicht vermischt, sondern entmischen sich und lagern sich getrennt zu verschiedenartigen Gefügekörnern zusammen (Bild 30).

b) Bei **Mischkristall-Legierungen** bleiben die Atome der Legierungselemente beim Erstarren der Schmelze gleichmäßig im Kristallgitter verteilt (Bild 31).

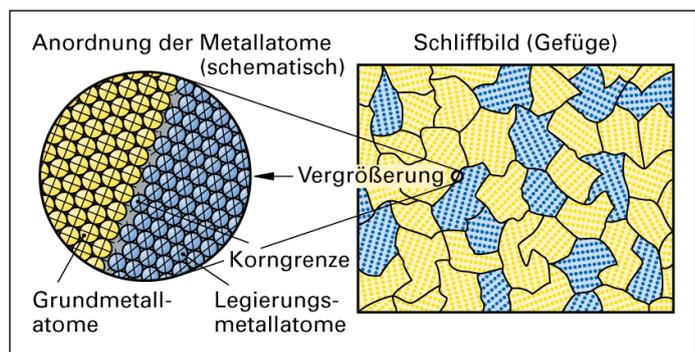
→ Legierungen haben gegenüber ihrem reinen Grundmetall meist verbesserte Eigenschaften, z. B. eine höhere Festigkeit, verbessertes Korrosionsverhalten oder größere Härte.

#### Aufgaben:

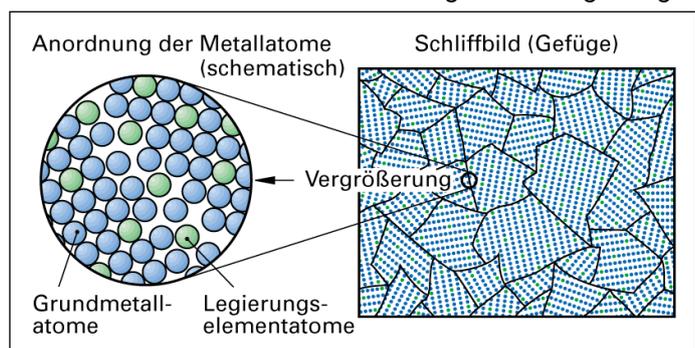
- 1) Was zeigt das Gefüge eines Metalls?
- 2) Wie sind die Metalle im atomaren Größenbereich aufgebaut?
- 3) Welche drei Kristallgittertypen findet man bei den Metallen?
- 4) Welche Kristallbaufehler gibt es?
- 5) Worauf beruht die elastische und die plastische Verformbarkeit der Metalle?
- 6) Wie entsteht das Metallgefüge?
- 7) Wie wird das Metallgefüge sichtbar gemacht?
- 8) Wodurch unterscheiden sich reine Metalle und Legierungen bezüglich Gefüge und Eigenschaften?



**Bild 29:** Innerer Aufbau eines reinen Metalls



**Bild 30:** Innerer Aufbau einer Kristallgemisch-Legierung



**Bild 31:** Innerer Aufbau einer Mischkristall-Legierung

## 4 Gefügearten der Eisen-Werkstoffe

### 4.1 Eisen und Eisenverbindungen

**Reines Eisen** spielt in der Technik keine Rolle. Es ist weich, leicht umformbar und magnetisierbar. Reines Eisengefüge wird **Ferrit** oder  **$\alpha$ -Eisen** genannt.

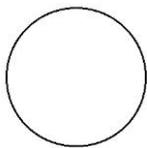
Eisenwerkstoffe enthalten aus dem Herstellungsprozess immer einen bestimmten Kohlenstoffgehalt. Obwohl man den Kohlenstoff nicht als Legierungselement bezeichnet, sind Eisen-Werkstoffe eigentlich kohlenstoffhaltige Eisen-Legierungen. Eisen mit bis zu 2,06% Kohlenstoff nennt man in der Werkstofftechnik **Stahl**, man spricht von **unlegierten Stählen** oder **Kohlenstoffstählen**.

Eisen mit mehr als 2,06% Kohlenstoff wird **Gusseisen** genannt.

In den Kohlenstoffstählen liegt der Kohlenstoff nicht elementar als Kohlenstoff vor, sondern chemisch gebunden als **Eisenkarbid  $Fe_3C$** . Dieser Gefügebestandteil wird **Zementit** genannt. Er ist hart und spröde und überträgt diese Eigenschaften, je nach Anteil, auf den Stahl.

Bezüglich der Ausscheidungsform stellen die Kohlenstoffstähle eine Besonderheit dar. Sie erstarren als **Kristallgemisch-Legierung**, wobei sich das Eisenkarbid in Form dünner Streifen (**Streifenzementit**) (Abb.4) in der Eisen-Grundmasse ausscheidet.

### 4.2 Gefügearten in Abhängigkeit vom Kohlenstoffgehalt



0% Kohlenstoff entspricht reinem Eisen. Das Schlifffbild (Abb.32) von **Ferrit** oder  **$\alpha$ -Eisen** zeigt die Eisenkörner mit den Korngrenzen.

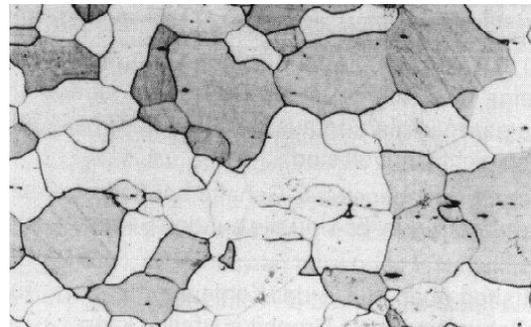
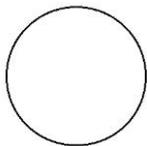


Abb.32: Eisen mit 0% C. M500:1



Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt **unter 0,8%** (**untereutktoide Stähle**) haben sowohl Körner, die aus **Ferrit** bestehen (hell) und Körner, deren Ferrit-Grundmasse mit **Streifenzementit** durchzogen ist (Abb.33). Diese Gefügekörner aus Ferrit-Grundmasse und Streifenzementit bezeichnet man als **Perlit-Körner**. Beim Vergütungsstahl 1C45 mit 0,45% Kohlenstoff besteht z.B. das Gefüge etwa jeweils zur Hälfte aus Perlitkörnern (Abb.34) und aus Ferritkörnern (Abb.32).

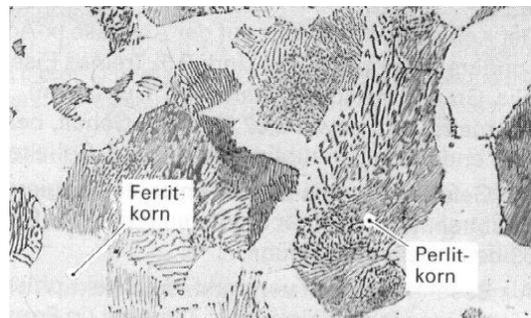
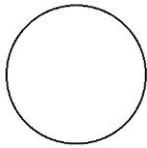
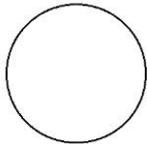
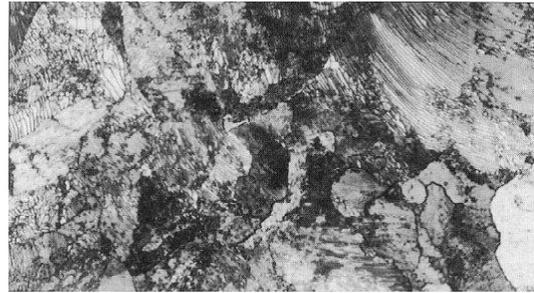


Abb.33: Untereutektoider Stahl 1C45 (0,45% C) M500:1



Stahl mit **0,8 %** Kohlenstoff (**eutektoider Stahl**) besteht aus **rein perlitischem Gefüge**) (Abb.34)

Abb.34: *Eutektoider Stahl C 80W1 (0,83% C - Perlit). M500:1*



Stähle mit einem Kohlenstoffgehalt von **0,8 bis 2,06 % (übereutektoide Stähle)** enthalten einen weiteren Gefügebestandteil, **den Korngrenzenzementit**. Er entsteht aus dem über 0,8 % liegenden Kohlenstoffanteil. Da alle Körner bei einem C-Gehalt von 0,8 % aus Perlit bestehen, scheidet sich der überschüssige Zementit an den Korngrenzen als Kornumrandung aus (Abb.35), wovon sich seine Bezeichnung **Korngrenzenzementit** ableitet. Diese **Korngrenzenzementit-Umrandung** (hell) der **Perlitkörner** wird mit steigendem Kohlenstoffgehalt breiter.

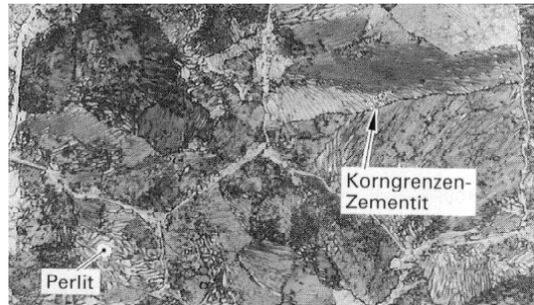


Abb.35: *Übereutektoider Stahl C 120 W1 (1,2% C). M500:1*

Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt **über 2,06 %** können je nach Abkühlungsbedingungen und zusätzlichen Legierungsbestandteilen ganz unterschiedliche Gefügearten bilden:

Bei **extrem langsamer Abkühlung** aus der Schmelze und/oder Siliciumgehalt erstarrt die Eisenschmelze mit mehr als 2,06 % Kohlenstoff nach dem „**stabilen**“ **Eisen-Graphit-Svstem**. Das bedeutet, dass sich der Kohlenstoff in reiner Form als Graphit ausscheidet. Er durchzieht die Gefüge-Grundmasse **als grobe Lamellen** (Abb.36).

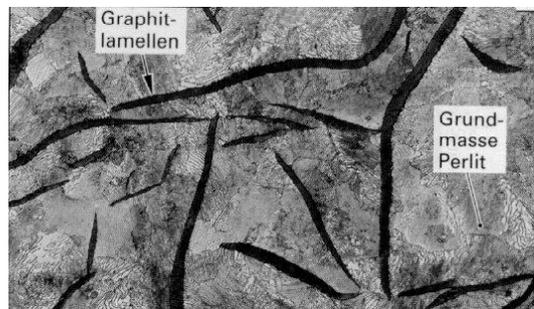


Abb.36: *Graphit-Lamellen im Grauguss GG-20 (3,5% C) mit Si-Gehalt nach langsamer Abkühlung. M500:1*

Bei **zügiger Abkühlung** erstarrt die Schmelze nach dem „**metastabilen**“ **Eisen-Zementit-System**. Es bildet sich ein Gefüge aus **rundlichen Perlitkörnern**, die von **Ledeburit-Gefüge** umgeben sind (Abb.37 und 38)

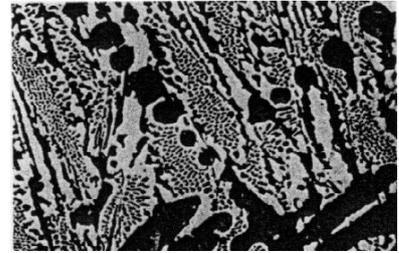


Abb.37: *Temperrohuss (2,8% C) nach rascher Abkühlung. M500:1*

Das **Ledeburit-Gefüge** besteht aus **Zementit** mit sehr fein verteilten **Austenitkristallen**. (=  **$\gamma$ -Mischkristalle**, Eisen – Kohlenstoff in kubisch-flächenzentriertem Gitter. Ein solches Gefüge hat z.B. Temperrohuss).

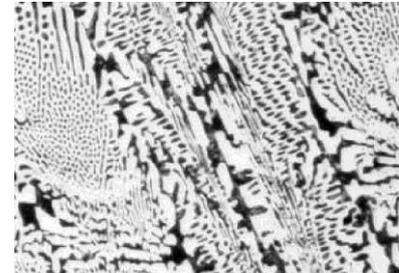
Der hohe Zementitanteil macht solche Eisen-Werkstoffe so hart und spröde, dass sie technisch nicht verwendbar sind.

Abb.38: Weißes Gußeisen. Perlit (dunkle Flächen) in Ledeburit. M100:1



Hat die Eisenschmelze **4,3% C**, so erstarrt sie zu einem Gefüge, das vollständig aus **Ledeburit** besteht. Es ist ein feines Gemenge aus **Zementitkristallen** und **Perlitbereichen**. (Abb.39)

Abb.39: Weißes Gußeisen. M500:1



In der technischen Praxis erstarren Eisen-Werkstoffe mit einem Kohlenstoffgehalt über 2,06 % nach einem **Eisen/Graphit - Eisen/Zementit-Mischsystem**, da sie einen erheblichen Siliciumgehalt besitzen.

Der überwiegende Kohlenstoffanteil scheidet sich als Graphitlamellen aus, während ein kleiner Kohlenstoffanteil als Streifen zementit (im Perlit) ausfällt. Das Gefüge derartiger Eisen-Werkstoffe besteht aus einer Ferrit-Perlit- oder rein perlitischen Grundmasse, in die Graphitlamellen eingelagert sind. Das Schlibbild (Abb.36) zeigt das typische Gefüge von Gusseisen mit Lamellengraphit.

### 4.3 Das Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild

In Zustandsschaubildern (auch Zustandsdiagramme genannt) sind die Aggregatzustände und die Gefügearten aller Zusammensetzungen einer Zweistofflegierung in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen.

Die technisch wichtigste Zweistofflegierung - das Legierungssystem Eisen-Kohlenstoff (Eisen-Werkstoffe) - hat ein kompliziert aussehendes Zustandsschaubild (Abb.40). Es besteht aus Gefügefeldern, die die vom Kohlenstoffgehalt und der Temperatur aufgespannte Schaubildebene füllen.

#### 4.3.1 Die Achsen im Diagramm

##### Die Abszisse

Der **Kohlenstoffgehalt** ist auf der Abszisse (x-Achse) aufgetragen: Als markante Kohlenstoffgehalte besonders gekennzeichnet sind:

- 0 % (reines Eisen, Ferrit),
- 0,83 % (mit rein perlitischem Gefüge)
- 2,06% (die Grenze zwischen Stahl und Gusseisen)
- 4,3 % (eine Eisenschmelze mit besonders niedrigem Schmelzpunkt) sowie
- 6,67 % (ein C-Gehalt, bei dem die ganze Legierung aus Zementit  $Fe_3C$  besteht).

Hier endet das Schaubild, da höhere C-Gehalte technisch nicht sinnvoll sind.

Die Gefügearten, die Eisen-Kohlenstoff-Legierungen der verschiedensten C-Gehalte bei Raumtemperatur haben, sind in der untersten Reihe des Schaubilds aufgetragen. Es sind die im Abschnitt 4.2 beschriebenen Gefüge.

Als Besonderheit sei vermerkt, dass bei Kohlenstoffgehalten über 2,06 % der Kohlenstoff je nach Abkühlungsgeschwindigkeit als Zementit (in Form von Ledeburit) oder als Graphit ausfallen kann.

### Die Ordinate

Auf der Ordinate (y-Achse) des Zustandsschaubildes ist die **Temperatur** aufgetragen.

Markante Temperaturen sind: die Raumtemperatur (am unteren Rand), die 723°C-Linie (hier findet die Gitterumwandlung vom kubisch-raumzentrierten zum kubisch-flächenzentrierten Kristallgitter statt) und 1536°C (die Schmelztemperatur von reinem Eisen).

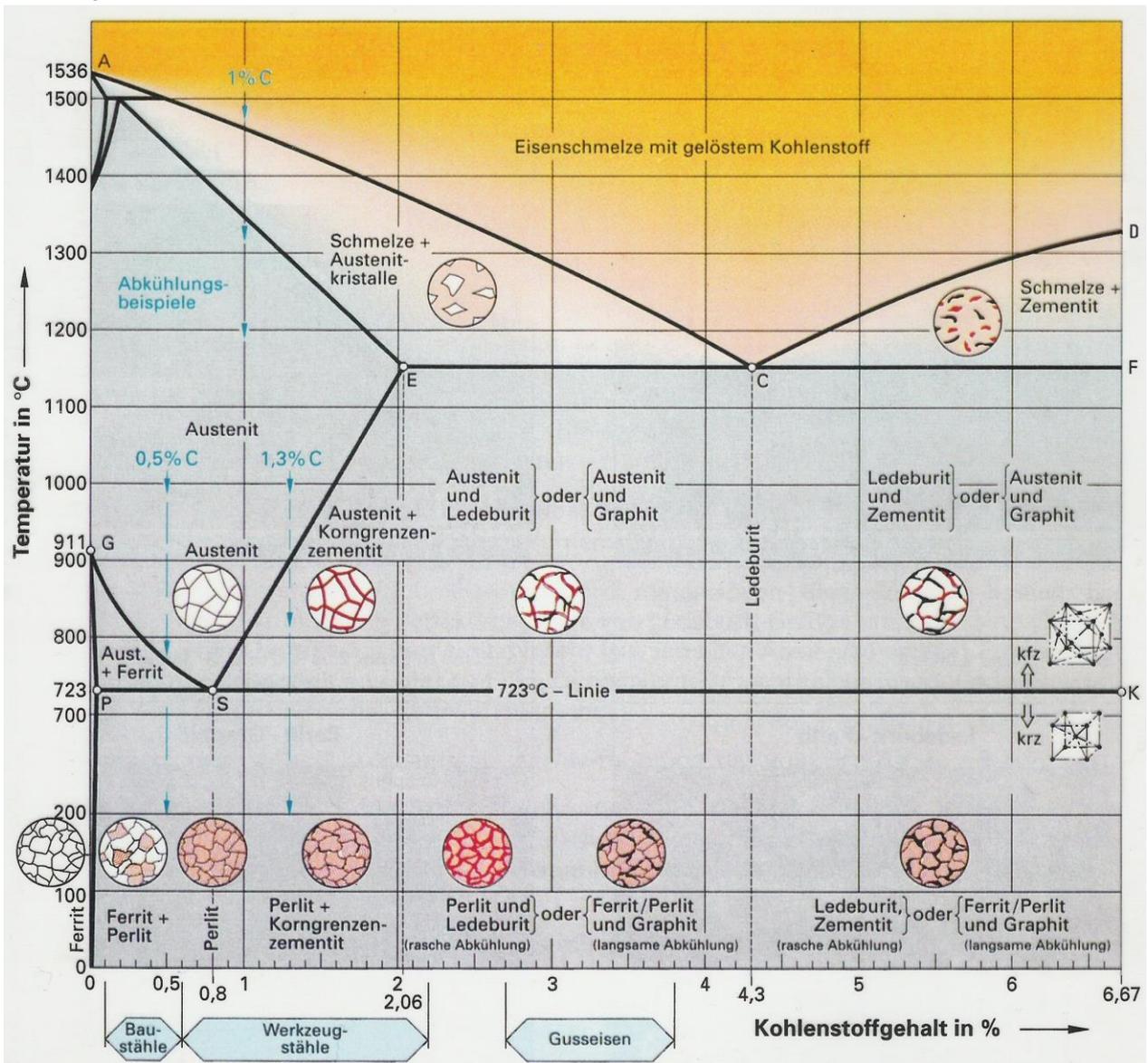


Abb.40: Eisen-Kohlenstoff-Zustandsschaubild und Gefügebereiche kohlenstoffhaltigen Eisens

### 4.3.2 Die Flächen im Diagramm

Jeder von Linien begrenzte Bereich im Zustandsschaubild stellt den Existenzbereich einer **Gefügeart bzw. eines Aggregatzustandes** dar. Die Linien markieren den Übergang von einer Gefügeart zur anderen. Die wichtigen End- und Schnittpunkte von Linien sind mit Großbuchstaben benannt.

Betrachtet man die Aggregatzustands- und Gefügebereiche systematisch, indem man von Eisenschmelzen unterschiedlichen Kohlenstoffgehalts ausgeht (der Bereich oberhalb der Linie A-C-D), so kann man folgendes feststellen:

**Oberhalb der Linie A-C-D:**

Bei Temperaturen über der Linie A-C-D sind alle Eisen-Kohlenstoff-Werkstoffe flüssig (Schmelze).

**Bei Unterschreiten der Linie A-C-D:**

Fällt die Temperatur der Werkstoffe unter die Linie A-C-D, beginnt ein teilweises Erstarren durch Ausscheiden einzelner Kristalle aus der Schmelze. Je nach C-Gehalt fallen unterschiedliche Kristalle aus:

- Bei einem **C-Gehalt von 0% bis 4,3%** bilden sich **Austenitkristalle** mit einem **kubisch-flächen-zentrierten Kristallgitter**. Bei weiterer Abkühlung fallen immer mehr Austenitkristalle aus, bis bei Erreichen der Linie A-E-C die ganze Schmelze erstarrt ist.
- Eisenschmelzen mit **4,3 bis 6,67% C** bilden nach Unterschreiten der Linie C-D bei **rascher** Abkühlung **Zementitkristalle**, bei langsamer Abkühlung auch Graphit. Bei weiterer Abkühlung schreitet die Ausscheidung voran, bis die Schmelze bei der Linie C-F (rund 1150°C) völlig erstarrt ist.
- Eine Sonderstellung nimmt die Eisenschmelze mit **4,3% Kohlenstoff** ein: Sie erstarrt wie ein reines Metall vollständig bei einer Temperatur von 1150°C zu einem feinkörnigen Gefüge, das **Ledeburit** genannt wird.

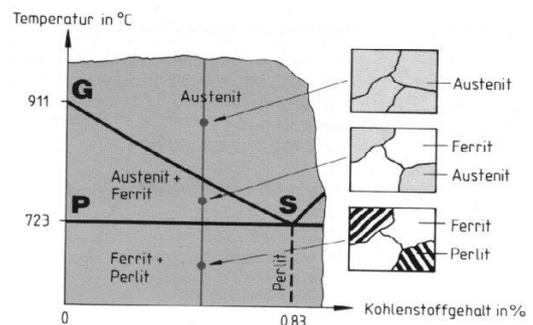
Solch ein **Schmelzpunktminimum** einer Legierung heißt **Eutektikum**.

**Bei weiterer Abkühlung:**

Kühlt die nunmehr erstarrte Eisen-Kohlenstoff-Legierung weiter ab, kommt es je nach C-Gehalt zu unterschiedlichen Vorgängen:

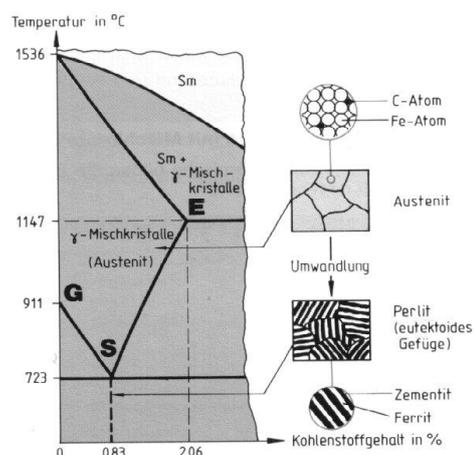
- Eisen-Werkstoffe mit **bis 2,06% C**, die **Stähle**, bestehen nach dem Erstarren aus Austenit.
  - Bei einem C-Gehalt **bis 0,83%** bezeichnet man die Legierungen als **untereutektoid**. Bei Abkühlung unter die Linie G-S entsteht zunächst Ferrit und bei weiterer Abkühlung unter die Linie P-S Perlit, so dass diese Stähle unterhalb 723°C ein Gefüge aus **Ferrit und Perlit** besitzen.

*Abb. 41: Abkühlung einer untereutektoiden Legierung*



- Stahl mit genau **0,83% C (eutektoide Zusammensetzung)** wandelt sich bei Abkühlung (Abb.42) unter 723°C vom Austenit in **reines Perlitgefuge** um.

*Abb. 42: Abkühlung einer eutektoiden Legierung*



- Bei einem C-Gehalt von **0,83 bis 2,06%** spricht man von einer **übereutektoiden** Legierung. Bei der Abkühlung (Abb.43) entsteht aus dem Austenit bei Unterschreiten der Linie S-E zunächst Korngrenzenzementit und bei weiterer Abkühlung unter die 723°C-Linie Perlit. Diese Stähle bestehen unterhalb 723°C aus Perlit, umgeben von **Korngrenzenzementit**.

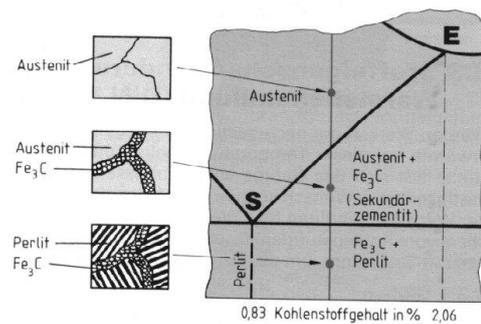


Abb.43: Abkühlung einer übereutektoiden Legierung

• Eisen-Werkstoffe mit einem C-Gehalt von **2,06% bis 4,3% (Gusseisen)** erstarren über die Zwischenstufe Austenit, je nach Abkühlungsgeschwindigkeit zu **Perlit** und **Ledeburit** oder **Ferrit/Perlit** und **Graphit**.

#### 4.4 Aufgaben

- 1) Welchen Feinbau haben die Metalle im mikroskopischen bzw. atomaren Bereich?
- 2) Welchen inneren Aufbau bildet die Legierung Austenit?
- 3) Welche Gefügearten kommen in Stahl bei Raumtemperatur vor?
- 4) Welches Gefüge hat Stahl mit 0,8% Kohlenstoff bei Temperaturen über bzw. unter 723°C?
- 5) Welchen Kristallgittertyp hat
  - a)  $\alpha$ -Eisen (Ferrit)?
  - b) Austenit?
- 6) Welche Gefügebestandteile enthält Gusseisen bei Raumtemperatur?
- 7) Welches Gefüge hat Stahl mit 0,4% Kohlenstoff bei Raumtemperatur?
- 8) Die nebenstehenden Gefügebilder gelten für Stahl.
  - a) Bezeichne nebenstehende Gefüge und Gefügebestandteile
  - b) Ordne die Bilder nach zunehmendem Kohlenstoffgehalt
  - c) Welches Gefüge ist rein perlitisch, übereutektoid, untereutektoid?
- 9) Wie verändert sich das Gefüge von Stahl mit 0,3% Kohlenstoff beim Erwärmen von Raumtemperatur auf 1000°C?



## 5 Wärmebehandlung von Stählen

Durch Wärmebehandlung können die Eigenschaften der Stähle (und Eisen-Gusswerkstoffe) in gewünschter Weise verändert werden. Besonders die Härte, die Festigkeit und die Bearbeitbarkeit lassen sich verbessern. Ursache der Verbesserung der Eigenschaften sind Veränderungen des Werkstoffgefüges.

Bei der Wärmebehandlung von Stählen unterscheidet man folgende Verfahren:

- Glühen,
- Härten,
- Vergüten,
- Randschichthärten,
- Einsatzhärten,
- Nitrierhärten,
- Carbonitrieren.

### Härten

Härten besteht aus mehreren Arbeitsgängen (Bild 44). Zuerst wird das Werkstück auf Härtetemperatur **erwärmt** und anschließend auf **Härtetemperatur gehalten**. Dann wird **abgeschreckt**, d. h. in Wasser oder Öl getaucht. Dadurch wird der Stahl sehr hart, aber auch spröde und bruchempfindlich. Deshalb wird das Werkstück anschließend angelassen, d. h. auf **Anlasstemperatur erwärmt**. Dann lässt man das Werkstück an der Luft **abkühlen**. Der Stahl hat dann seine Gebrauchshärte.

→ Härten ist eine Wärmebehandlung, die Stähle hart und verschleißfest macht.

Vor allem Werkzeuge und auf Verschleiß beanspruchte Bauteile werden gehärtet (Bild 45).

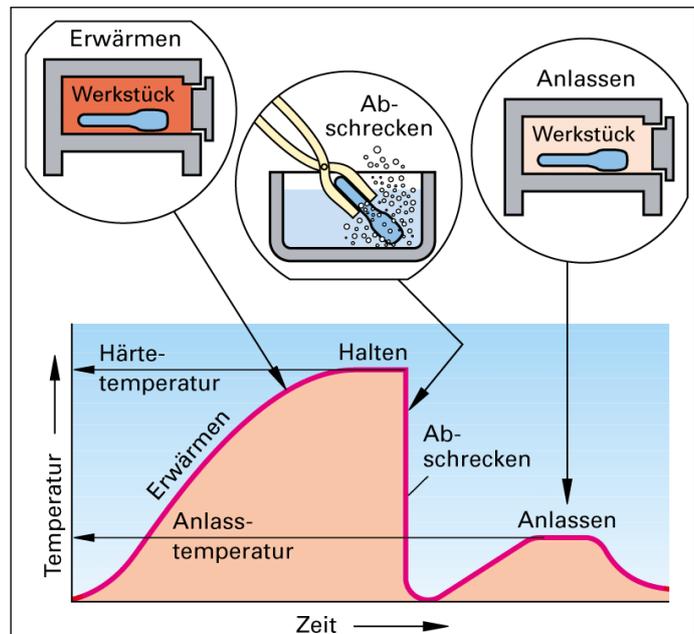


Bild 44: Temperaturverlauf beim Härten

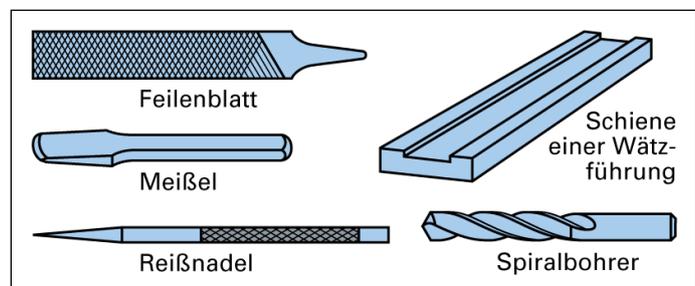


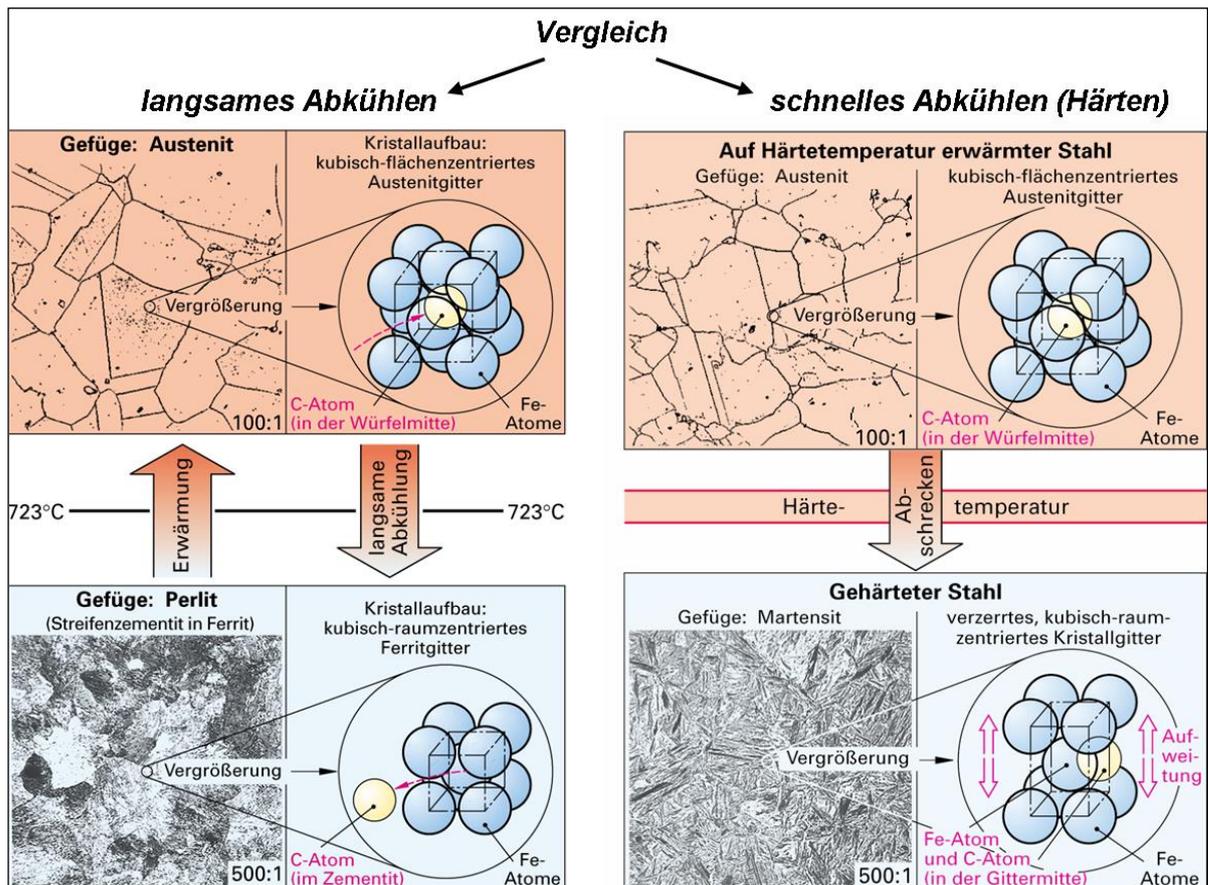
Bild 45: Wärmebehandelte Werkstücke (gehärtet)

### 5.1 Innere Vorgänge beim Härten

- Beim **Erwärmen** von Stahl über die Linie GSK im Fe-C-Zustandsdiagramm wandelt sich das kubisch-raumzentrierte Ferritgitter in das kubischflächenzentrierte Austenitgitter um. Der freiwerdende Platz in der Kristallmitte wird von einem Kohlenstoffatom besetzt, das aus dem Gefügebestandteil Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) stammt. Im Schlifffbild ist diese Umwandlung als Austenitgefüge sichtbar.
- **Langsame Abkühlung.** Kühlt man den austenitisierten Stahl langsam ab, so wird die Umwandlung rückgängig gemacht. Es entsteht wieder ein kubisch-raumzentriertes Kristallgitter (Bild 46). Das Kohlenstoffatom wandert (diffundiert) aus der Würfelmitte heraus und bildet mit Eisenatomen Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), der sich als Streifen zementit ausscheidet. Es entsteht perlitisches Gefüge, wie es vor der Erwärmung vorlag.

- Abschrecken.** Wird der austenitisierte Stahl jedoch sehr rasch abgekühlt, dann klappt das kubisch-flächenzentrierte Austenitgitter bei Unterschreiten der Linie GSK schlagartig in das kubischraumzentrierte Ferritgitter um (Bild 46). Das Kohlenstoffatom in der Kristallmitte hat keine Zeit aus dem Gitter herauszuwandern. Es befindet sich nun ein Kohlenstoffatom und zusätzlich ein Eisenatom in der Gittermitte. Dadurch wird das Kristallgitter stark verzerrt. Es entsteht ein feinnadeliges Gefüge, das man Martensit nennt. Es ist sehr hart, aber spröde. Martensit entsteht nur, wenn das Werkstück ausreichend schnell abgeschreckt wird (mit einer Mindestabkühlgeschwindigkeit) und wenn ein ausreichender Kohlenstoffgehalt des Stahls vorhanden ist.

→ Nur Stähle mit mehr als 0,2% Kohlenstoff sind zum Härten geeignet.



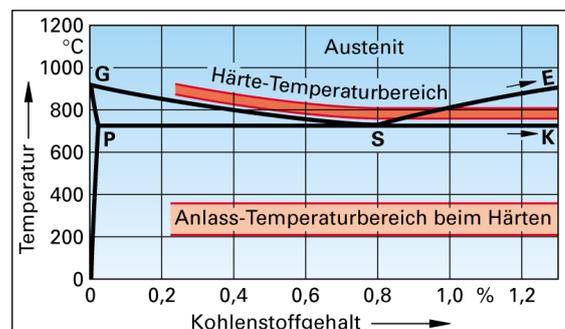
**Bild 46:** Gefügeumwandlung beim langsamen Abkühlen und beim Abschrecken (Härten)

## 5.2 Arbeitsschritte beim Härten

### 5.2.1 Erwärmen und Halten auf Härtetemperatur

Die Werkstücke werden durch Einbringen in einen vorgeheizten Härteofen im vollen Querschnitt auf Härtetemperatur erwärmt (Durchwärmen) und für bestimmte Zeit auf Härtetemperatur gehalten.

Bei **unlegierten Stählen** ist die Härtetemperatur vom Kohlenstoffgehalt abhängig und kann im Eisen-Kohlenstoff-Zustandsdiagramm dargestellt werden (Bild 47). Sie soll etwa 40°C über der Linie GSK liegen. Dadurch wird eine sichere Umwandlung des Ferrit-Perlit-Gefüges in Austenit erreicht.



**Bild 47:** Härte und Anlasstemperaturen unlegierter Stähle

Zu niedrige Härtetemperatur hat ungehärtete Werkstückbereiche (Weichfleckigkeit) zur Folge. Zu hohe Härtetemperatur führt zu grobnadeligem Härtegefüge mit großer Sprödigkeit.

Unlegierte Stähle mit mehr als 0,8% Kohlenstoff werden vor dem Härten weichgeglüht, so dass sie aus einer ferritischen Grundmasse mit kleinen Zementitkörnern bestehen. Beim Härten erhält man dann ein feinnadeliges Martensit-Grundgefüge mit eingelagerten Zementitkörnern.

Bei **legierten Stählen** sind die Härtetemperaturen meist höher als bei unlegierten Stählen und die Haltezeiten länger. Sie sind in den Normblättern der Werkstoffe enthalten und können entweder dort oder aus den Wärmebehandlungsvorschriften der Stahlhersteller abgelesen werden.

### 5.2.2 Abschrecken

Das rasche Abkühlen der auf Härtetemperatur erwärmten Werkstücke wird durch Eintauchen in Wasser oder Öl bzw. in Emulsionen oder durch Anblasen mit Luft erreicht. Beim Abschrecken ist die Haltung des Werkstücks beim Eintauchen und seine Bewegung in der Abschreckflüssigkeit wichtig, damit ungleichmäßiges Abschrecken und damit Härteverzug vermieden wird (Bild 49). Es muss gewährleistet sein, dass sich die auf der heißen Werkstückoberfläche bildenden Dampfblasen rasch ablösen. Anhaftende Dampfblasen wirken wie eine Wärmedämmung und verhindern ein gleichmäßiges Abkühlen des Werkstücks.

### 5.2.3 Anlassen

Nach dem Abschrecken ist der Stahl sehr hart und spröde. Er besitzt wegen des harten und spröden Martensits innere Gefügeverspannungen, die Härteverzug, Härterisse und bei Belastung Spröbruch bewirken können.

Um diese Versprödung zu verringern, werden die frisch gehärteten Werkstücke auf Anlasstemperatur erwärmt, eine Zeitlang auf Temperatur gehalten und dann langsam abgekühlt. Unlegierte und niedrig legierte Stähle werden bei 200°C bis 350°C angelassen (Bild 47), hochlegierte Stähle bei 500°C bis 700°C.

Durch das Anlassen wird die Sprödigkeit des Stahls vermindert, er erhält ein gewisses Maß an Zähigkeit. Die Härte nimmt durch das Anlassen nur geringfügig ab.

Beim Anlassen bilden sich auf blanken Werkstückoberflächen Anlassfarben. Sie können zum Abschätzen der Anlasstemperatur benutzt werden. Damit die Anlassfarben gut sichtbar sind, müssen die anzulassenden Teile an einer Stelle durch Schleifen blank gemacht werden.

#### Aufgabe zum Lehrerversuch:

Notiere bei den Versuchen jeweils die Versuchsparmeter und -ergebnisse.

Vergleiche die mechanisch-technologischen Eigenschaften der Stahlsorten ohne und mit Wärmebehandlung, indem du sie in einem Diagramm einträgst.

Zeichne ein Diagramm mit der Temperatur als Abszissenachse. Die Temperatur entspricht der Härtetemperatur beziehungsweise der Raumtemperatur bei nicht gehärteten Proben.

Trage die Zugfestigkeit, die Streckgrenze, die Bruchdehnung, die Rockwellhärte und gegebenenfalls die Kerbschlagarbeit der Proben über der Härtetemperatur auf. Hierzu brauchst du mehrere Ordinatenachsen. Die Eigenschaften mit gleicher Einheit können auf der gleichen Ordinate eingetragen werden.

Solch ein Diagramm mit einer Abszissenachse und mehreren, verschiedenen Größen auf mehreren Ordinatenachsen bezeichnet man als **Schaubild**.

**Frage:** Wie haben sich bei den Proben die mechanisch-technologischen Eigenschaften durch die Wärmebehandlung verändert? Begründe diese Veränderungen mit den Vorgängen im Werkstoff.

## 5.3 Weitere Informationen zum Härten

### 5.3.1 Abschreckemittel

Abkühlungsgeschwindigkeit kann durch Verwendung verschiedener Abschreckmittel eingestellt werden (Bild 48).

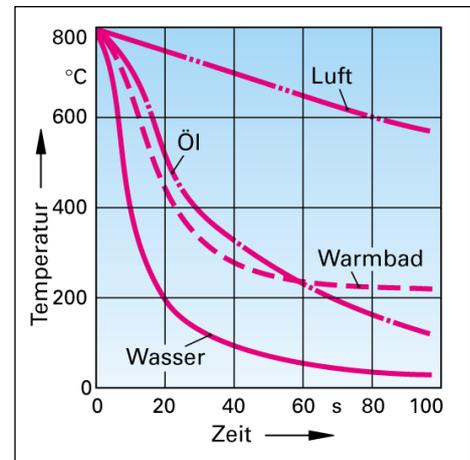
**Wasser** besitzt die stärkste Abschreckwirkung. Mit Wasser werden unlegierte Stähle wie z. B. C60U abgeschreckt, da sie zum Härten eine schroffe Abschreckwirkung (Mindestabkühlungsgeschwindigkeit) benötigen.

**Öle** haben eine mildere Abschreckwirkung als Wasser. Die Verzugs- und Rissgefahr ist wesentlich geringer. In Öl werden niedrig legierte Stähle abgeschreckt, wie z. B. 50CrMo 4.

**Wasser-Öl-Emulsionen** oder **Wasser-Polymer-Emulsionen** liegen in ihrer Abschreckwirkung zwischen Wasser und Öl.

**Warmbad-Abschreckbäder** sind Salzschnmelzen von 200°C bis 500°C. Die Werkstücke werden im Warmbad abgeschreckt, dort 5 bis 15 Minuten gehalten und dann an der Luft abgekühlt.

**Bewegte Luft** hat die mildeste Abschreckwirkung. Sie wird bei hochlegierten Stählen, z.B. HS6-5-2-5, zum Abkühlen verwendet.



**Bild 48:** Abkühlungskurven

### 5.3.2 Einhärtungstiefe

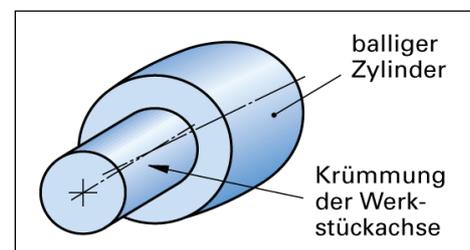
Beim Abschrecken wird die Wärme in der Randschicht des Werkstücks schneller abgeleitet als im Werkstückinnern. Die Abkühlungsgeschwindigkeit ist daher in der Randschicht am größten und nimmt nach innen ab. Bei unlegiertem Werkzeugstahl bildet sich aufgrund der unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeit nur in der Randschicht Martensit, im Werkstückinnern entsteht Perlit (Bild 34).

Unlegierte Stähle haben deshalb nur eine 5mm tiefe, gehärtete Randschicht, der Werkstückkern ist ungehärtet. Sie härten nicht durch. Für eine Reihe von Anwendungen ist geringe Einhärtetiefe erwünscht, z. B. bei Zahnrädern. In anderen Fällen benötigt man durchgehärtete Werkstücke, z.B. bei Wälzlagern.

Legierte Stähle härten überwiegend durch.

### 5.3.3 Härteverzug und Härterisse

Gehärtete Werkstücke weisen Maß- und Formänderungen, den so genannten Härteverzug auf (Bild 49). Bei besonders schroffer Abschreckung können sogar Härterisse auftreten.



**Bild 49:** Härteverzug

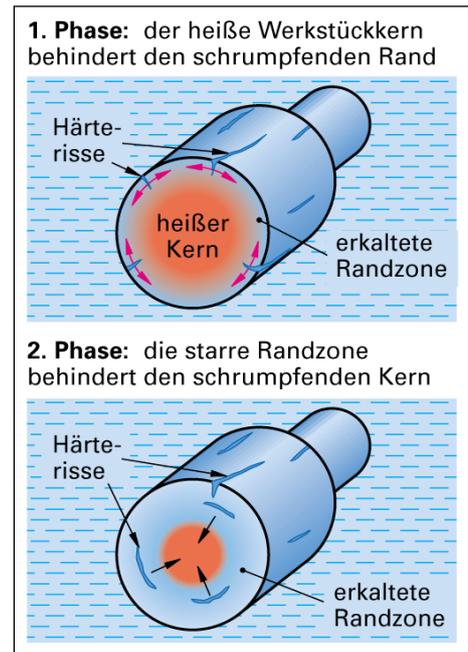
Härteverzug und Härterisse entstehen in zwei Phasen

Beim Eintauchen in das Abschreckmittel erkaltet die Randzone sehr schnell und verkürzt sich dadurch (1. Phase) (Bild 50). Der noch heiße Kern hat noch seine ursprüngliche Größe und behindert das Schrumpfen der Randzone. Es kommt zu Verspannungen, Verzug oder Rissen am Umfang.

Im weiteren Verlauf kühlt auch der Kern ab und will schrumpfen (2. Phase). Dabei wird er von der starren Randzone behindert. Es entstehen Verspannungen, Verzug und Risse zwischen Kern und Randzone. Zusätzlich kommt es noch durch die Martensitbildung zu Verspannungen, da Martensit ein um 1 % größeres Volumen als Ferrit hat.

Verzugarmes und rissfreies Härten erreicht man durch:

- Verwendung eines mildereren Abschreckmittels.
- Gebrochenes Härten: das Werkstück wird kurz in Wasser abgeschreckt, dann herausgenommen und im Ölbad abgekühlt.
- Stufenhärten: das Werkstück wird in einem Salzbad, z. B. bei 450°C, abgeschreckt und danach an der Luft abgekühlt.



**Bild 50:** Entstehung von Härteverzug und Härterissen

## 6 Literaturverzeichnis zum Kapitel „Werkstofftechnik“

Auszüge aus Werkstofftechnik für Metallberufe  
Europa-Lehrmittel  
ISBN 3-8085-1543-0

Fachkunde Metall  
Europa-Lehrmittel  
ISBN 38085-1153-2Technologie Metall

Technologie Metall  
Grundlagen 1./2. Ausbildungsjahr  
Cornelsen Girardet  
ISBN 3-590-81990-1

Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung  
Wilhelm Domke  
Verlag Girardet  
ISBN 3-7736-1219-2