

## **Das werkstoffkundliche Praktikum im Magnesium-Innovationscenter des HZG, Leitung Dr. Hort**

Das Programm stand unter dem Motto „Werkstoffkunde - Metall“. Dazu hatten wir von Herrn Dr. Hort vom HZG einige Wochen zuvor schon einen Vortrag im Rahmen einer Veranstaltung am Hansa gehört. Nun sollten wir den Beruf auch praktisch kennenlernen. Es gab mehrere Themen, die wir mit Doktor Hort behandelten: Einen theoretischen und praktischen Teil zu den Themen: Formguss (Feinguss), Phasendiagramme und Festigkeit (Streckgrenze, E-Modul).

### **Übersicht**

#### Formguss (Feinguss)

Es wird ein Wachsmo­dell eines Gegenstandes erstellt. Dann wird eine Gipsform gebaut, später das Wachs ausgeschmolzen, sodass die Form abgegossen werden kann. Diese Art des Formgusses ist seit Jahrtausenden bekannt und wird auch heute noch eingesetzt. Sie kann damit beispielhaft für ein urformendes Verfahren angesehen werden.

#### Phasendiagramme

Die Metalle Zinn und Blei sind vergleichsweise niedrig schmelzend.

Legierungen dieser Metalle werden aufgeschmolzen und man misst während der Erstarrung den Verlauf der Temperatur.

Aus den Messwerten lässt sich dann schematisch ein eutektisches Zustandsdiagramm zeichnen.

Man kann an Hand des Diagramms sehen, wie sich der Schmelzpunkt durch Legieren verändert. Grund: Die unterschiedlichen Partner weisen unterschiedliche Atomradien, Gitterstrukturen und Schmelzpunkte auf. Weitere typische Zustandsdiagramme werden ebenfalls angesprochen, um später Erklärungen für das Verhalten von Werkstoffen in den anderen Versuchen zu haben.

#### Zugversuch

Im Zugprüfversuch wird die Festigkeit einer Aluminiumlegierung. Die Bestimmung der Festigkeit ist die grundlegende Untersuchung für das Anwendungsprofil eines Werkstoffes.

### **Im Detail**

#### **Formguss (Feinguss)**

Das über 5000 Jahre alte Feingussverfahren besteht aus folgenden Schritten:

Es wird zuerst ein Positivmodell aus Wachs erstellt.

Das Modell wird anschließend mit Vaseline bestrichen, damit es sich später nicht mit dem Gips verbindet (Trennmittel). Außerdem werden zwei Spieße am Modell befestigt, die im Gips Luftlöcher freihalten sollen, damit die Form später komplett mit Zinn gefüllt werden kann.

Das fertige Modell wird in ein Bad mit flüssigem Gips (Calciumsulfat mit einem halben Mol Kristallwasser) gehängt.

Wenn der Gips abgebunden hat, wird bei 130°C im Ofen das Wachs aus der Form herausgeschmolzen. So gibt es im Gipsblock eine Kavität (Hohlraum in Form des Wachsmodells), in die das Zinn hinein gegossen werden kann.

Der Gips wird bei 250°C im Ofen gebrannt, damit ein Teil des Kristallwassers verdampft. Dadurch wird verhindert, dass beim Eingießen des heißen Zinns durch die Dampfentwicklung die Form beschädigt wird. Außerdem sind durch den geringeren Temperaturunterschied zwischen Gips und Zinn die Spannungen im Material geringer.

Jedoch wirkt sich das Verdampfen des Kristallwassers negativ auf die Festigkeit des Gipses aus. Deshalb ist ein Kompromiss zwischen Trockenheit und Stabilität zu finden.

Das heiße, flüssige Zinn wird in das Gips-Negativ gegossen. Da es beim Abkühlen an Volumen verliert, befindet sich im Einfüllloch ein Überschuss, der die Volumenverluste ausgleicht.

Auffällig ist, dass das Zinn im Inneren des Einfülllochs weiter in die Form fließt, während es am Rand früher erstarrt. Ursache hierfür ist die höhere Temperatur im Innern der Flüssigkeit.

Nachdem das Zinn komplett erstarrt ist, kann die Gipsform mit dem Hammer entfernt werden und das Werkstück ist fertig.



In Kürze

Es wird ein Positivmodell aus Wachs erstellt.

Das Modell wird mit Vaseline bestrichen, damit es sich später nicht mit dem Gips verbindet (Trennmittel).

Das Modell wird in ein Bad mit flüssigem Gips gehängt.

Der Gips bindet ab.

Das Wachs wird im Ofen aus der Form herausgeschmolzen.

Das heiße, flüssige Metall wird in das Gips-Negativ gegossen.

Nach dem Erstarren des Metalls wird die Gipsform entfernt und das Werkstück ist fertig.

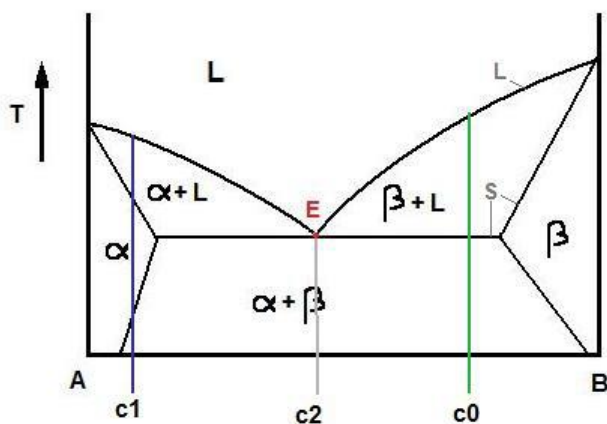
## Phasendiagramme und Abkühlungskurven

Phasendiagramme geben einem Aufschluss darüber, welche Phasen und Gefügestände in einem Legierungssystem bei bestimmten Temperaturen und chemischen Zusammensetzungen vorliegen können.

Zum Erstellen der Phasendiagramme schmilzt man Legierungen bekannter Konzentrationen ein und nimmt Abkühlungskurven auf. Die Abkühlungskurven enthalten charakteristische Knick- und Haltepunkte, die für Phasenumwandlungen bzw. vollständiges Erstarren stehen. Aus den Knick- und Haltepunkten der Abkühlungskurven ergeben sich die Linien der Phasendiagramme.

Bei unserem Praktikum sind wir genau den umgekehrten Weg gegangen. Wir haben Abkühlungskurven von geschmolzenen Blei-Zinn-Legierungen mit verschiedenen Konzentrationen aufgenommen und dann mit Hilfe eines Phasendiagramms die ungefähre quantitative Zusammensetzung der Proben ermittelt.

### Phasendiagramm



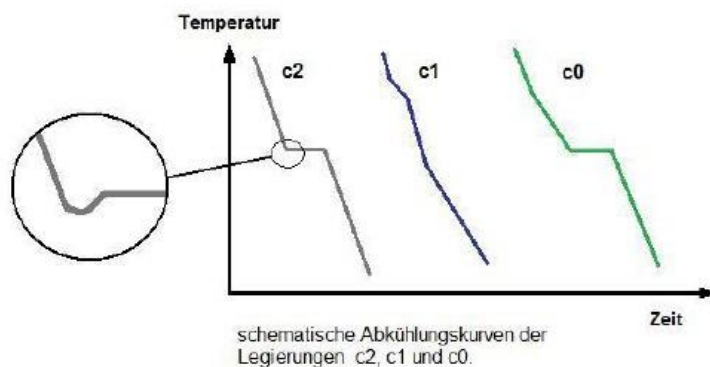
Schematisches eutektisches Phasendiagramm einer binären Legierung mit begrenzter Löslichkeit im festen Zustand

**Legende:** L = Liquiduslinie, S = Soliduslinie, Punkt E = Eutektischer Punkt,  $\alpha$  = Mischkristall hauptsächlich aus Metall A (mit geringer Menge B),  $\beta$  = Mischkristall hauptsächlich aus Metall B (mit geringer Menge A)

### Eutektikum

Am eutektischen Punkt liegt eine bestimmte Konzentration der Metalle vor, bei der nun beide gleichermaßen erstarren. Es entsteht ein extrem feines Gemisch aus Körnern, das Eutektikum.

### Abkühlungskurven



## Erläuterungen zu den Abkühlungskurven

C2 stellt die Abkühlungskurve eines reinen Metalls oder einer eutektischen Legierung dar. Es gibt einen Haltepunkt, aber keine Knickpunkte. Der Haltepunkt gibt die Temperatur an, bei der die gesamte Schmelze erstarrt. Da wir die Schmelze sehr schnell abgekühlt haben, wurde sie unterkühlt, d.h. sie begann erst einige K unter der eigentlichen Erstarrungstemperatur fest zu werden. Durch die frei werdende Kristallisationsenergie erwärmt sich die Probe wieder leicht. Während des Erstarrungsvorgangs bleibt die Temperatur konstant.

C1 ist die Abkühlungskurve einer Legierung mit einem sehr hohen Anteil des Grundmetalls A und einem geringen Anteil des Legierungselements B und zeigt den Verlauf einer sehr langsamen Abkühlung (ca. 1K/min). Es gibt drei Knickpunkte, die die Phasenübergänge anzeigen.

C0 beschreibt die Abkühlungskurve einer Legierung mit einer relativ gleichmäßigen Zusammensetzung. Es gibt einen Knickpunkt, welcher einen Phasenübergang anzeigt und einen Haltepunkt bei der eutektischen Temperatur.

## Der Zugversuch

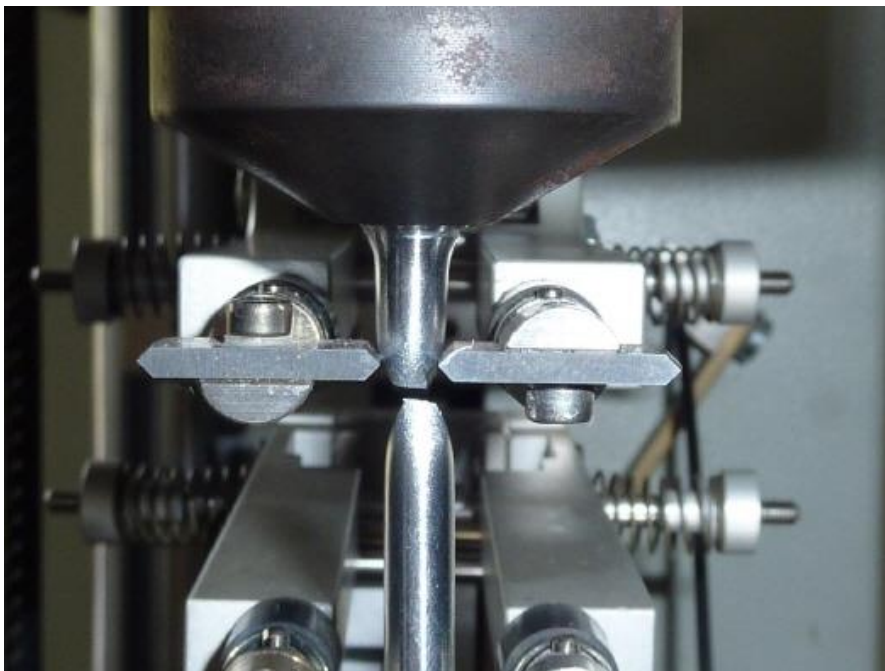
Ziel des Versuchs ist es, die Festigkeit eines Werkstückes zu bestimmen.

Unter Festigkeit versteht man den Widerstand des Materials gegen Verformung.

In diesem Versuch tritt als erstes **elastische** (reversible), dann **plastische** (irreversible) **Verformung** und schließlich **Bruch** auf. Die Verformungen resultieren aus Gitterfehlern.

Durch Versetzungen im Werkstück wird die Verformung gehemmt, sodass man eine höhere Festigkeit, aber gleichzeitig auch einen spröderen Werkstoff erhält.

Das Versuchsstück, das Versuchsgerät und die Versuchsdurchführung müssen bestimmten Normen (DIN 5125 und ISO ...) entsprechen, damit die Ergebnisse vergleichbar sind.



## Der Aufbau des Zugversuches

Nachdem das Werkstück eingespannt ist, muss die Maschine erst die nötige Betriebsspannung erreichen. Anschließend messen Messfühler den Ausgangsquerschnitt. Auf das Werkstück wird einachsige Spannung ausgeübt. Am Computer wird ein Diagramm angezeigt (X-Achse: Dehnung, gemessen durch den Zuwachs des Abstandes zwischen den Messfühlern; Y-Achse: ausgeübte Spannung).

Wir haben ein Werkstück aus Aluminium, legiert mit Magnesium und Silicium für den Test verwendet, wobei Magnesium die Festigkeit erhöht und Silicium die Schmelztemperatur senkt. Das Werkstück besitzt am oberen und unteren Ende je ein Gewinde, wodurch ein sicheres Einspannen gewährleistet ist.

Die Gewinde haben einen größeren Querschnitt als das restliche Werkstück.

Der Bruch des Werkstücks wird im schmaleren Teil auftreten, da die Kraftwirkung einer gleichgroßen Kraft auf einer kleineren Fläche größer ist als die Wirkung derselben Kraft auf eine größere Fläche.

Man kann die Lokalisation der Bruchstelle durch Vorschädigen des Werkstücks (z.B. eine Kerbe) beeinflussen.

Polykristalle sind fester und haben daher einen kleineren E-Modul. Glas ist amorph (Körner zeigen nicht in die gleiche Richtung). Ein Gummiband hat nur einen elastischen Bereich und reißt auch in diesem, da es immer in seine Ausgangsform zurück geht außer es reißt, es gibt also keine plastische Verformung.

Bei einer plastischen Verformung ziehen sich die Versetzungen bis an die Oberfläche und das Metall wird matt und einzelne Kristalle werden sichtbar sowie eine Verlängerung des Werkstücks.

Der **E-Modul** des Werkstoffs kann man an der Steigung des ersten Teils des Graphen ablesen. Je fester ein Stoff ist, desto kleiner ist der E-Modul. Für Aluminium beträgt er z.B. 225 MPa für den Baustahl S235 ca. 235 MPa.

Polykristalle sind fester und haben daher einen kleineren E-Modul. Glas ist amorph (Körner zeigen nicht in die gleiche Richtung). Ein Gummiband hat nur einen elastischen Bereich und reißt auch in diesem, da es immer in seine Ausgangsform zurückgeht, außer es reißt; es gibt also keine plastische Verformung.

Am Graphen kann man neben dem E-Modul auch die Streckgrenze ablesen. Während der plastischen Verformung fällt der Graph trotz höherer Kraft sehr stark ab, da der Computer alle Berechnungen auf der Grundlage des Ausgangsquerschnitts macht, obwohl der tatsächliche Querschnitt erheblich gesunken ist.

Konstrukteure versuchen immer 30-40% unter der Streckgrenze zu bleiben, wenn sie Werkstoffe für bestimmte Einsatzgebiete auswählen.

Der Zugversuch kann auch unter hohen Temperaturen ausgeführt werden, sodass die Eigenschaften in einem bestimmten Temperaturbereich (z.B. im Automotor) untersucht werden können.

Je größer die Zuggeschwindigkeit im Versuch ist, desto größer ist die Festigkeit, da sich die zur Verformung nötigen Versetzungen weniger gut durch den Kristall bewegen können.

## Der Versuch

Das Werkstück bestand aus Aluminium mit Legierungselementen: Magnesium zur Erhöhung der Festigkeit und Silicium, um den Schmelzpunkt zu senken.

Um die Zugfestigkeit zu ermitteln, wurde die Probe in eine dafür vorgesehene Maschine eingespannt, indem das Werkstück an den Enden mit den Gewinden oben und unten hineingedreht wurde. Den Normen entsprechend wurde das Werkstück auseinander gezogen. Über zwei Sensoren, auch Schneiden genannt, die oben an der Probe und unten angesetzt wurden, wurde der Dehnungsbetrag gemessen. Dafür wurde die Bewegung der Sensoren aufgezeichnet. Auf dem Computerbildschirm war in dem Diagramm die Spannung in Abhängigkeit von der Dehnung abgetragen.

## Beobachtung

Zu Anfang war am Werkstück keine Veränderung zu sehen. Lediglich durch den Graphen war zu erkennen, dass schon eine Kraft wirkte. Die Kurve stieg stetig an bis eine Dehnung von 2% erreicht wurde. Dann stieg die Kurve langsamer und nicht so steil. Bei 12 % Dehnung, also 6 mm, riss die Probe.

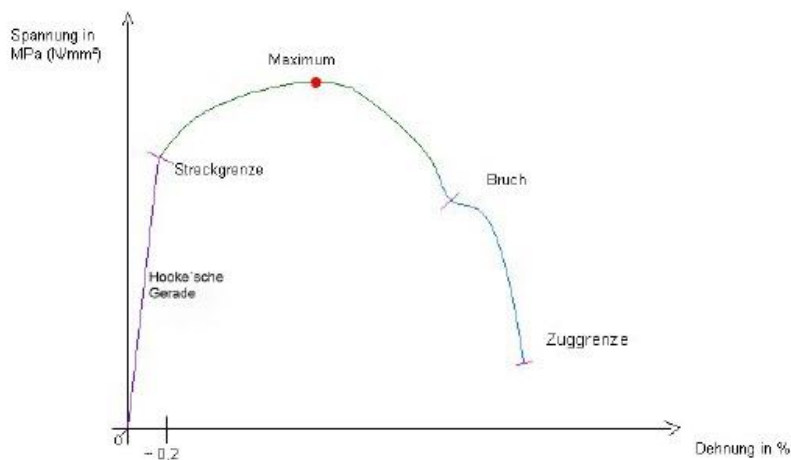
## Deutung

Zu Anfang war am Werkstück keine Veränderung zu sehen und lediglich am Verlauf des Graphen war zu erkennen, dass schon eine Kraft wirkte, weil sich das Werkstück zunächst nur elastisch verformte. Die Verformung ist reversibel, wenn die Kraft nachlässt.

Die Kurve stieg stetig an bis eine Dehnung von 2% erreicht wurde. Die Streckgrenze war dann erreicht. Danach begann die plastische Verformung, bei der die Probe nicht mehr in ihre ursprüngliche Form zurückgehen konnte.

Wenn die Streckgrenze erreicht ist, steigt die Kurve langsamer und nicht so steil an aufgrund des abnehmenden Durchmessers des Werkstoffs durch die Verformung.

Der Werkstoff wird schneller gedehnt, was auch an der Probe zu erkennen war. Bei 12 % Dehnung, also 6 mm, riss die Probe. Auch der Abfall der Kurve ist mit dem geringeren Durchmesser zu begründen.



Maximum = absolute Festigkeit = Zugfestigkeit  
Steigung der Geraden = Maß der Spannung / Maß der Verformung = E-Modul

## Spannungs-Dehnungs-Diagramm

## **Die Theorie hinter dem Zugversuch**

Für die Angabe von Kennwerten der Zugfestigkeit gibt es zwei Orientierungspunkte, an denen man die Zugfestigkeit misst. Der erste Punkt ist die plastische Verformung, nach dem als zweiter Punkt das Versagen des Werkstückes folgt.

Um diese beiden Werte zu erhalten, wendet man das oben beschriebene Verfahren der Zugfestigkeitsprobe an. Allerdings kann man nicht die Stelle, an der das Werkstück bricht, vorhersagen. Da man die genauen Orte der Fehlerstellen, an denen hauptsächlich Brüche entstehen, nicht sehen kann, kann man auch keine Bruchstellenvorhersagen machen. Fehlerstellen können Leerstellen, Versetzungen oder Stellen mit Bearbeitungsfehlern sein.

Leerstellen wiederum sind Stellen im Metallgitter, an denen Atome fehlen. Durch die Selbstdiffusion der Atome können diese Leerstellen von anderen Atomen besetzt werden, wodurch dafür an anderen Stellen des Metallgitters Leerstellen entstehen. Mit steigender Temperatur nehmen auch die Leerstellen zu (Entropie steigt).

Gitterebenen, die einfach in einem Metallgitter enden, nennt man Versetzungen. Sie gehören auch zu den Fehlerstellen oder auch Gitterfehlern.

Doch entstanden die Brüche nicht an den Gewinden, weil dort der Durchmesser größer ist als in der Mitte des Werkstücks. Deswegen bricht das Werkstück eher in der Mitte.

Um eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Werkstoffen garantieren zu können, wurden Normen festgelegt: Die ISO-Norm (eine internationale Norm) und die DIN-Norm (Deutsche Industrie Norm). In diesen Normen werden die Geschwindigkeit des Ziehens, die Temperatur und die aufzuwendenden Kräfte festgelegt. Die Schritte, mit denen der Ablauf des Bruches beschrieben werden können, werden ebenfalls festgelegt.

Einerseits wird in die Streckgrenze (= erste plastische Verformung 0,2%) und andererseits in die Zuggrenze (= Reißen/ Versagen des Werkstücks) unterschieden. Weitere Versuche um die Belastbarkeit eines Werkstoffes zu testen, sind der Druckversuch oder der Biegeversuch.

Aufgrund von entstandenen Versetzungen hat das Werkstück eine matte Farbe an der Rissstelle erhalten. Durch die Zugkraft haben sich die Kristallite gegeneinander verschoben.

## **E-Modul**

Ein E-Modul ist ein Elastizitätsmodul, wodurch angegeben wird, wie lange noch keine plastische Verformung entsteht, das heißt, wie lange die Atombindungen halten. Bei Polykristalliten ist das E-Modul geringer als bei Monokristalliten. Aufgrund von Korngrenzen und Leerstellen, die nur in Polykristalliten vorhanden sind, können schneller Brüche an den anfälligen Stellen entstehen.

## **Veränderung von Gitterstrukturen**

Eisen weist verschiedene Gitterstrukturen bei unterschiedlichen Temperaturen auf. Bei Raumtemperatur besitzt es eine kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur und ab 750°C verändert sich seine Gitterstruktur zu kubisch-raumzentriert. Dieses Phänomen nennt man auch Polymorphie.

Ein Grund für die Veränderung der Gitterstruktur ist die geringere Einnahme von Raum. Durch die Veränderung des Aufbaus wird Raum eingespart oder wenn mehr Raum vorhanden ist, wird eine mehr Fläche beanspruchende Gitterstruktur angenommen. Durch das Hinzugeben von verschiedenen anderen Legierungselementen kann man die Veränderung der Gitterstruktur hinauszögern, dass die Veränderung erst in höheren Temperaturen stattfindet oder man kann sie Veränderungstemperatur auch herabsetzen. Indem man Aluminium zu Eisen hinzugibt, wird

Temperatur zur Veränderung der Gitterstruktur nach oben verschoben. Zwischen die Eisenkörner setzen sich Aluminiumkörner, die ein wenig breiter sind als die Eisenkörner. Dadurch wird der Gitterverband des Eisens gespannt, sodass bei höheren Temperaturen nicht sofort die mehr Platz einnehmende kubisch-raumzentrierte Struktur einnimmt.

### **Cup and Cone**

Ein Bruch eines Werkstücks, dessen beiden Bruchstücke exakt wieder zusammengesetzt werden können. Dabei besitzt das eine Bruchstück eine leichte Innenwölbung und das entsprechende Gegenstück eine leicht Wölbung nach außen. Die plastische Verformung entsteht beim Bruch.

Beispiel für Monokristalle: Legierung an einer Straßenlaterne

### **Druckversuch**

Auf ein kreisrundes flaches Werkstück wird mit einem Stempel Druck ausgeübt. Dafür wird das Werkstück auf einen runden Ring, der dicker und stabiler als die Werkstoffplatte ist, gedrückt. Um alle Eigenschaften der Platte aus zu testen, werden Geschwindigkeiten der Druckausübung, Temperaturen, Kräfte und der Bau der Stempel variiert. Wenn man einen großen Stempel verwendet, kann mehr Kraft auf das Werkstück ausgeübt werden, als wenn man einen kleinen Stempel verwendet. Bei einem großen Stempel verteilt sich die Kraft auf eine größere Fläche, während sie sich bei einem kleinen Stempel auf eine geringe Fläche konzentriert. Außerdem verwendet man auch eckige Stempel, bei denen aufgrund der ungleichmäßigen Kraftverteilung keine gleichmäßige Verformung stattfindet und kein plastisches Fließen möglich ist.